МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

М. М. ЭФРУССИ

ГРОМКО-ГОВОРИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

Выпуск 919

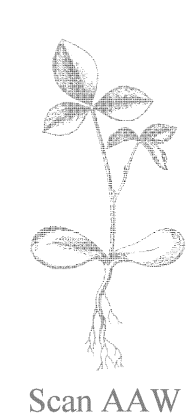
М. М. ЭФРУССИ

ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Издание второе,
переработанное и дополненное



«ЭНЕРГИЯ» · МОСКВА · 1976



6Ф2.7
Э94
УДК 621.396.623

Михаил Михайлович Эфрусси

ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Редактор А. П. Ефимов
Редактор издательства Р. М. Малинин
Обложка художника П. П. Перевалова
Технический редактор Т. А. Маслова
Корректор З. Б. Драновская

Сдано в набор 15/III 1976 г. Подписано к печати 27/VII 1976 г. Т-11097. Формат 84×108 1/32. Бумага типографская № 1. Усл. печ. л. 7,56. Уч.-изд. л. 10,02. Тираж 60 000 экз. Зак. 548. Цена 44 коп.
Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 600610, г. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

Эфрусси М. М.

Э94 Громкоговорители и их применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1976.
144 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 919)

В книге подробно описаны принцип работы и устройство электродинамических головок громкоговорителей прямого излучения и рупорных громкоговорителей, приведены основные данные головок отечественного производства. Описаны различные виды акустического оформления громкоговорителей, даны рекомендации по их расчету и конструированию. Приведена методика расчета разделительных электрических фильтров для двух- и трехполосных акустических систем. Рассказано об особенностях стереофонических систем и применении электромеханической обратной связи.

Книга рассчитана на широкий круг радиолюбителей, а также на средний технический персонал, работающий в области радиовещания, звукоусиления и телевидения.

$Э \frac{30403\text{-}441}{051(01)\text{-}76}$ 191-76 6Ф2.7

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Громкоговорители — самые распространенные электроакустические приборы (преобразователи). Они являются неотъемлемой частью радиоприемников, телевизоров, киноустановок, электрофонов (проигрывателей) и магнитофонов, систем звукоусиления и оповещания. Несмотря на многообразие применений, в настоящее время используют исключительно громкоговорители с электродинамическими головками, которые являются наилучшими. За рубежом получили некоторое распространение и электростатические (конденсаторные) громкоговорители.

От акустических показателей громкоговорителей решающим образом зависит качество звуковоспроизведения. Широкий и постоянный интерес к высококачественному воспроизведению звука стимулирует непрерывное совершенствование громкоговорителей и их акустического оформления.

Актуальность вопроса применения громкоговорителей, а также выпуск новых типов громкоговорителей обусловили второе издание книги «Громкоговорители и их применение». По сравнению с первым изданием в книге незначительно расширены разделы, посвященные описанию электродинамических головок громкоговорителей, расчету и изготовлению различных видов их акустического оформления, добавлены разделы, касающиеся электромеханической отрицательной обратной связи и особенностей громкоговорителей для стереофонического воспроизведения.

Наряду с опытом автора, в книге использованы материалы, опубликованные в советской и зарубежной технической литературе.

Автор

ОСНОВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ТЕРМИНЫ И ЕДИНИЦЫ

Звук — волновой колебательный процесс, происходящий в упругой среде (воздухе, воде и др.) и вызывающий слуховое ощущение.

Звуковое поле — область пространства, в которой распространяются звуковые волны.

Звуковое давление — разность между статическим (атмосферным) давлением и давлением в данной точке звукового поля. Мгновенное значение звукового давления — звуковое давление в рассматриваемый момент времени.

Различают максимальное (пиковое) и минимальное звуковые давления, представляющие собой максимальное и минимальное значения мгновенного звукового давления, а также эффективное (среднеквадратичное) значение звукового давления за полный период. Согласно Международной системе единиц физических величин СИ единицей звукового давления является паскаль (Па). Один паскаль равен ньютону на квадратный метр (Н/м^2). В системе СГС звуковое давление выражают в динах на квадратный сантиметр (дин/см^2); отсюда 1 Па = 10 дин/см^2.

В дальнейшем, применяя термин «звуковое давление», будем иметь в виду, его эффективное значение, если нет специальной оговорки.

Интенсивность звука (прежнее название: сила звука) — среднее значение мгновенной плотности потока звуковой энергии, — представляет собой поток свободно распространяющейся звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны. Единица интенсивности звука в системе единиц СИ — ватт на квадратный метр (Вт/м^2), а в системе единиц СГС — эрг/(с·см^2). Последняя единица соответствует 0,001 Вт/м^2; наоборот, 1 Вт/м^2 = = 10^3 эрг/(с·см^2).

Если направление распространения звуковой волны определить трудно или невозможно, используют другую энергетическую характеристику поля — плотность звуковой энергии.

Плотность звуковой энергии — звуковая энергия, содержащаяся в единице объема. Единица измерения — Дж/м^3.

Звуковая мощность — поток звуковой энергии, проходящий за 1 с через данную поверхность, перпендикулярно ей. Единица измерения — ватт (Вт). 1 Вт = 10^7 эрг/с. Определяют звуковую мощность по значениям звукового давления или интенсивности звука.

Скорость звука, точнее, скорость распространения звуковой волны — путь, проходимый звуковой волной в однородной среде за единицу времени; выражается в метрах в секунду (м/с).

Скорость звука зависит от плотности и упругости среды, например: в воздухе при температуре 20°С и нормальном атмосферном

давлении она равна 344 м/с, в морской воде — 1504 м/с, в стали — 4990 м/с, в древесине сосны 3320 м/с.

Колебательная скорость — скорость колебательного смещения частиц среды от положения покоя.

Длина волны — расстояние между ближайшими точками волны, находящимися в одинаковой фазе; расстояние, проходимое распространяющейся волной за один период колебания. В приводимых ниже формулах длина волны выражается в метрах.

Период — время, в течение которого происходит одно полное колебание.

Частота — число колебаний в секунду. Единицы измерения — герц и килогерц (Гц, кГц). 1 кГц=1000 Гц. Во всех формулах, приводимых в этой книге, частота выражена в герцах.

Фаза — стадия движения колеблющейся частицы или тела относительно какого-либо их положения, принятого за начальное. Выражается в радианах или угловых градусах.

Синфазность (равнофазность) — одинаковая фаза переменных гармонических величин. Синфазное включение громкоговорителей — электрическое соединение громкоговорителей, при котором мгновенные значения создаваемых ими звуковых давлений находятся в одинаковой фазе.

Чистый тон — звук, создаваемый синусоидальным акустическим колебанием.

Шум — неприятный или нежелательный звук случайного характера, не содержащий ясно выраженных частотных составляющих.

Белый шум — сложный звук, спектр которого, измеренный анализатором с постоянной шириной полосы, является непрерывной и гладкой функцией частоты в достаточно широком диапазоне частот, или шумовой сигнал, уровень спектральной плотности мощности которого постоянен во всем диапазоне частот измерений.

Розовый шум — шумовой сигнал, уровень спектральной плотности энергии которого при повышении частоты снижается с постоянной крутизной, равной 3 дБ на октаву во всем дипазоне частот измерений.

Спектр акустический — характеристика звука, выражающая его частотный (спектральный) состав, получаемая в результате анализа звука.

Биение — периодическое изменение интенсивности звука в данной точке, вызываемое интерференцией двух звуковых волн близких частот.

Интерференция — взаимодействие двух или более звуковых волн, одновременно приходящих в данную точку, приводящее к ослаблению или усилению интенсивности звука в зависимости от разницы в фазах волн (от фазового сдвига).

Дифракция — изменение направления распространения звуковой волны, вызванное прохождением ее около края какого-либо препятствия (огибание препятствия).

Реверберация — затухающее звучание в закрытом помещении после прекращения действия источника звука, обусловленное многократными отражениями звука от ограничивающих поверхностей.

Время реверберации — время, в течение которого интенсивность звука уменьшается в миллион (10^6) раз от ее начального значения, а уровень интенсивности звука спадает на 60 дБ.

Громкость — субъективное ощущение интенсивности звука; изменение громкости приблизительно пропорционально логарифму изменения интенсивности звука.

Стоячая волна — результат наложения двух бегущих синусоидальных волн, распространяющихся в противоположных направлениях: падающей и отраженной; характеризуется различными амплитудами в различных точках пространства.

Явление (эффект) Допплера — изменение высоты звука (частоты колебаний) вследствие движения источника звука. При приближении к слушателю источника звука его высота увеличивается

$$f_1 = f_0 \frac{c + a}{c},$$

где f_1 — частота колебаний слышимого звука; f_0 — частота колебаний источника звука; c — скорость звука; a — скорость движения источника.

При удалении источника от слушателя его высота уменьшается согласно формуле

$$f_1 = f_0 \frac{c - a}{c}.$$

Тембр звука — характерная особенность («окраска») сложного звука, определяемая количеством и интенсивностью обертонов.

Обертоны (гармоники) — дополнительные тоны, частоты которых кратны частотам основного тона (в целое число раз больше).

Унтертоны — тоны, частоты которых в целое число раз ниже частоты основного тока.

Октава — интервал (полоса) частот, отношение большей крайней частоты которого к меньшей равно двум.

В общем виде отношение крайних частот полосы $f_{макс}/f_{мин}=2^n$, где n — количество октав. Таким образом, число октав равно логарифму при основании 2 отношения крайних частот. Например, отношение двух частот, интервал между которыми составляет $1/3$ октавы: $f_{макс}/f_{мин}=2^{1/3}=1{,}26$.

Обратная задача заключается в нахождении числа октав, соответствующего заданному отношению частот. Например, если отношение частот равно 1,41, то $2^n=1{,}41$. Следовательно, $n=3{,}33\cdot\lg 1{,}41$. С помощью таблиц или логарифмической линейки находим, что $n=0{,}5$ октавы.

Динамический диапазон какой-либо переменной величины (например, напряжения или тока) определяется отношением максимального ее значения к минимальному, т. е.

$$D = U_{макс}/U_{мин}.$$

Чаще динамический диапазон выражают в логарифмических единицах уровня — децибелах:

$$D = 20 \lg \frac{U_{макс}}{U_{мин}}; \quad D = 10 \lg \frac{P_{макс}}{P_{мин}},$$

где U — напряжение, P — мощность.

Понятие «динамический диапазон» имеет важное значение в технике радиовещания, звукозаписи и звуковоспроизведения. Ввиду того что минимальное значение электрического или акустического сигнала практически ограничивается уровнем шума, сохранение натурального динамического диапазона некоторых инструментов и ансамблей потребовало бы чрезмерно высоких уровней сигнала и

мощностей; это трудно осуществимо и экономически нецелесообразно. Поэтому в радиовещании и звукозаписи динамический диапазон уменьшают (сжимают).

Сопротивление излучения — комплексное акустическое сопротивление, которым колеблющаяся (вибрирующая) поверхность, например диффузор головки громкоговорителя, нагружен со стороны воздушной среды. Сопротивление излучения характеризует величину связи вибрирующей поверхности с окружающей средой.

Сопротивление излучения имеет активную составляющую, определяющую излучаемую мощность, и реактивную, определяющую связанную с излучателем присоединенную массу среды, которая прибавляется к собственной массе излучателя.

Демпфирование — увеличение механических потерь (трения) в колебательной системе, уменьшающее ее резонансные свойства.

Уровень — величина акустического или электрического сигнала, выраженная в логарифмических единицах — децибелах.

Децибел — логарифмическая относительная единица уровня; обозначение: дБ.

Применение понятия «уровень» в практике расчета и измерений избавляет от необходимости иметь дело с очень малыми или дробными числами. Кроме того, использование этого понятия исключает необходимость в перемножении или делении величин, заменяя эти действия сложением или вычитанием, что непосредственно вытекает из правил применения логарифмов (логарифм произведения равен сумме логарифмов сомножителей).

Одним из оснований широкого использования в акустике и электроакустике единиц уровня — децибелов явилось то, что субъективное ощущение громкости в зависимости от интенсивности звука подчиняется психофизиологическому закону: с изменением интенсивности звука ощущение громкости изменяется приблизительно пропорционально логарифму изменения интенсивности звука. Вот почему наше ухо может воспринимать громадный динамический диапазон интенсивности звука, достигающий на средних частотах значения 10^{12}. Использование шкалы уровней позволяет выразить этот огромный диапазон интенсивности звука всего лишь 120 дБ. Переход к уровню от абсолютной величины производится логарифмированием отношения этой величины к условно выбранной величине той же размерности (нулевой).

Уровень интенсивности звука в децибелах выражается формулой

$$N_I = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

где I — интенсивность звука; I_0 — интенсивность звука частотой 1 кГц на пороге слышимости; $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м^2 $= 10^{-9}$ эрг/(с·см^2).

Поскольку интенсивность звука пропорциональна второй степени звукового давления ($I = kp^2$), соответствующий уровень звукового давления в децибелах выражается формулой:

$$N_p = 10 \lg \frac{kp^2}{kp_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0},$$

где p — данное эффективное значение звукового давления и $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па $= 2 \cdot 10^{-4}$ дин/см^2.

Подобно акустическим уровням введено понятие электрического уровня. Электрические уровни выражают через отношение мощно-

стей или напряжений:

$$N = 10\lg\frac{P}{P_0} = 10\lg\frac{U^2/R}{U_0^2/R_0} = 20\lg\frac{U}{U_0} + 10\lg\frac{R}{R_0},$$

причем $P_0=0{,}001$ Вт, $U_0=0{,}775$ В, $R_0=600$ Ом. Значение U_0 получается из соотношения, связывающего мощность, напряжение и сопротивление $U_0=\sqrt{P_0 R_0}$.

Из приведенных выражений следует, что уровни, вычисленные по отношению напряжений, совпадают с уровнями, вычисленными по отношению мощностей, при условии, что сопротивления нагрузок, на которых выделяются мощности P и P_0, равны ($R=R_0$).

Если уровни вычислены по мощности, причем $P_0=0{,}001$ Вт, то к единице уровня иногда добавляют букву «м», т. е. обозначают ее дБм.

То обстоятельство, что энергетические величины (интенсивность, мощность и т. п.) переводятся в значения уровня с множителем 10, тогда как перевод исходных линейных величин (звуковое давление, напряжение, ток) в значения уровня совершается с множителем 20, обеспечивает одинаковое изменение уровня физической величины независимо от того, по каким величинам она оценивается. Это очень важно, так как устраняет возможную путаницу.

Пример. Звуковое давление, создаваемое громкоговорителем, увеличилось в 2 раза ($p_2/p_1=2$); следовательно, уровень звукового давления изменился на 6 дБ. Интенсивность звука при этом увеличилась в 4 раза ($I_2/I_1=4$), но уровень интенсивности звука изменился также на 6 дБ ($10\lg 4$).

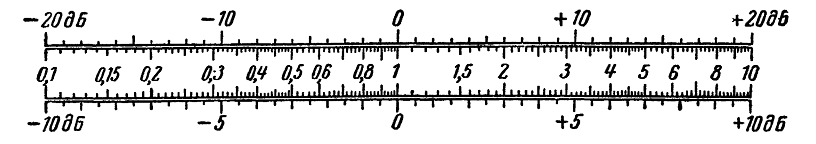


Рис. 1. Номограмма для перевода отношения двух величин в децибелы и обратно.

На верхней шкале нанесены уровни звуковых давлений, напряжений, токов; на нижней — уровни интенсивностей звука и мощности; на средней — отношения величин, уровни которых отыскиваются.

Перевод абсолютных значений сигнала в единицы уровня удобно производить с помощью логарифмической линейки: вычислив отношение двух значений величины (переводимой и соответствующей нулевому уровню, например, p/p_0), находят логарифм этого отношения и умножают его на 20 (или 10). Можно такое вычисление не производить, если воспользоваться графиком, приведенным на рис. 1.

Если переводимая в значения уровня физическая величина (мощность, напряжение) меньше величины, соответствующей нулю уровня, то уровень станет отрицательным (так как отрицателен логарифм правильной дроби).

ОСОБЕННОСТИ ЗВУКОВОГО МАТЕРИАЛА

Речь и музыка представляют собой сочетание различных по частоте и силе звуков, непрерывно изменяющихся в процессе звучания. Звук, произведенный голосом певца или музыкальным инструментом и воспринимаемый как тон определенной высоты, на самом деле содержит ряд дополнительных тонов различной интенсивности — обертонов (гармоник), частоты которых в целое число раз больше основной частоты звука. Соотношением их интенсивностей определяется тембр звука. Высоту (тональность) звука определяет основная, самая низкая частота такого сложного колебания. При выборе необходимой полосы частот звуковоспроизводящего устройства и его звеньев (усилитель, громкоговоритель и т. п.), а также при оценке качества звукоусилительной системы по ее техническим характеристикам исходят из данных о натуральном частотном диапазоне и особенностях звучания музыкальных инструментов. Основные частоты звуков, производимых различными музыкальными инструментами, охватывают полосу частот приблизительно от 16 Гц до 4 кГц; однако со стороны низших частот этот диапазон практически ограничивается частотой 30 Гц, так как музыкальные тоны более низких частот встречаются очень редко. Таким образом, полосу от 30 Гц до 4 кГц следует считать нормальным диапазоном основных частот музыкальных инструментов. Однако для сохранения специфической тембровой окраски звучания музыкальных инструментов и обеспечения этим большей натуральности звучания необходимо воспроизводить и создаваемые инструментами обертоны. Это требование передвигает верхнюю границу воспроизводимых частот к 16—20 кГц.

Речь охватывает более узкий частотный диапазон: женская — от 200 до 1300 Гц по основным частотам и до 8 кГц с обертонами, мужская — от 70 до 700 Гц по основным частотам и до 5 кГц с обертонами. Певчие голоса имеют следующие диапазоны основных частот: бас — 90—350 Гц, тенор — 130—500 Гц, сопрано 250—1200 Гц.

Вместе с тем звучание различных инструментов и голосов характеризуется динамическим диапазоном, причем более «мощные» инструменты имеют больший диапазон. Различен и динамический диапазон музыкальных ансамблей; он зависит от того, какими инструментами и в каком количестве создается максимальная и минимальная интенсивность звука (фортиссимо и пианиссимо). Наибольшим динамическим диапазоном обладает симфонический оркестр, у которого отношение интенсивности звука всего состава музыкальных инструментов и интенсивности звука скрипки-соло составляет 65—75 дБ, в среднем 70 дБ, что соответствует отношению интенсивностей в 10^7 раз. Звуковоспроизведение диапазона частот 30 Гц — 16 кГц — технически довольно трудная задача. Она решается путем усложнения и удорожания аппаратуры.

Тщательные экспериментальные исследования позволили установить нормы допустимых ограничений полосы воспроизводимых частот и неравномерности частотной характеристики для различных классов качества звуковоспроизведения (ГОСТ 11515-65).

Другие исследования были посвящены изучению статистических характеристик различных натуральных звучаний музыкального характера. В частности, изучение распределения динамических уровней большого числа звучаний позволило решить вопрос о необходимом

соотношении номинальных мощностей двухполосной и эквивалентной ей широкополосной звуковоспроизводящей системы при различных частотах разделения полного частотного диапазона на две части. Так, при частоте разделения 570 Гц мощность низкочастотной части должна составлять 0,84, а высокочастотной — 0,59 мощности широкополосной системы. При частоте разделения 900 Гц относительная мощность низкочастотной части должна составлять 0,91, высокочастотной — 0,51; при частоте разделения 1430 Гц мощность низкочастотной части должна составлять 0,98, высокочастотной — 0,4 мощности широкополосной системы.

Таким образом, по мере увеличения частоты разделения отношение мощностей низкочастотной и высокочастотной частей увеличивается: для частоты разделения 570 Гц отношение мощностей равно 1,42; для частоты 900 Гц — 1,78 и для частоты 1430 Гц — 2,45.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯХ

Громкоговоритель представляет собой электроакустический преобразователь электрической энергии в звуковую, смонтированный в акустическом (внешнем) оформлении. Последнее зависит от конструкции преобразователя и акустических требований к громкоговорителю.

Основной элемент громкоговорителя — электроакустический преобразователь называют головкой громкоговорителя. Известно несколько типов громкоговорителей, отличающихся методом преобразования электрической энергии в звуковую, используемым в головке. Это — электромагнитные, пьезоэлектрические, электростатические (конденсаторные), термоионные и электродинамические громкоговорители.

В головке электромагнитного громкоговорителя электромагнит, питаемый током звуковой частоты, воздействует на якорь из мягкой стали, соединенный с диффузором (диафрагмой), излучающим звук. Такие громкоговорители были широко распространены в 30-х годах и в настоящее время полностью вытеснены более совершенными громкоговорителями с электродинамическими головками.

В пьезоэлектрических громкоговорителях для создания колебаний диффузора используется обратный пьезоэлектрический эффект. Он основан на механической деформации пластинок, вырезанных из кристаллов какого-либо пьезоэлектрического материала. Пластинки деформируются под действием электрического поля, создаваемого напряжением звуковой частоты, приложенным к обкладкам пластинок.

Пьезоэлектрические громкоговорители на основе кристаллов сегнетовой соли имели низкие акустические и эксплуатационные показатели, и поэтому широкого распространения не получили. Однако в последнее время начали применять высокочастотные пьезоэлектрические громкоговорители, в которых используется пьезоэлектрическая керамика, например полусфера из цирконат-титаната свинца (из пьезокерамики можно прессовать преобразователь любой формы).

Электростатический (конденсаторный) громкоговоритель представляет собой постоянный конденсатор обычно больших габаритов. Одна из его обкладок, изготовленная из тонкой полимерной пленки, металлизированной с одной стороны, служит мембраной, излучающей звук. Вторая обкладка обладает большой массой и неподвиж-

на. Мембрана приводится в колебания силами взаимного притяжения обкладок, пропорциональными напряжению между ними. Это напряжение складывается из постоянного поляризующего напряжения, значительной величины, и много меньшего, переменного напряжения звуковой частоты, наложенного на поляризующее.

Воспроизведение низших звуковых частот электростатическим громкоговорителем встречает известные трудности. Дело в том, что на этих частотах амплитуда колебаний мембраны велика, следовательно, расстояние между электродами не может быть малым, а это понижает чувствительность громкоговорителя. Поэтому электростатические громкоговорители используют преимущественно для воспроизведения средних и высших частот. При этом они обладают неплохими акустическими показателями, но вследствие несколько увеличенных габаритов и некоторой сложности конструкции имеют очень малое распространение.

В термоионном громкоговорителе (ионофоне) для излучения звука используются пульсации ионного облака, создаваемого раскаленным электродом в сильном электрическом поле. Пульсации ионного облака возбуждаются модуляцией со звуковой частотой приложенного к электродам высокого напряжения, в результате чего изменяется значение последнего.

В ионофонах может также использоваться факельный разряд, возникающий в разрыве высокочастотной (частоты порядка мегагерц) электрической цепи, являющейся мощным источником создания ионов. Пульсации ионного облака (плазмы) с частотой модулирующего напряжения вызывают колебания окружающего облако воздуха. Для увеличения эффективности излучателя излучение звука ионофоном производится через рупор. Ионофоны не получили распространения вследствие сложности устройства, а также потому, что ионизация воздуха представляет некоторую опасность для здоровья.

В головке электродинамического громкоговорителя происходит взаимодействие между полями постоянного магнита и катушки, питаемой током звуковой частоты. Катушка колеблется и приводит в движение диффузор (диафрагму). Громкоговоритель с электродинамической головкой появился в 1926 г. и уже много лет является самым распространенным в мире типом громкоговорителя. Это обусловлено высокими его акустическими показателями, большой прочностью и надежностью. Выпуск громкоговорителей с электродинамическими головками непрерывно увеличивается и составляет астрономическую цифру. Так, например, в Японии количество головок электродинамических прямого излучения, потребляемых изготовителями радиоэлектронной аппаратуры, увеличилось в 1974 г. на 49% по сравнению с 1972 г. В СССР только за 13 лет (с 1959 по 1962 г.) выпущено 327 млн. головок электродинамических громкоговорителей.

Головки громкоговорителей излучают звук в воздушную среду непосредственно или с помощью рупора. Соответственно их называют громкоговорителями прямого излучения и рупорными. Громкоговорители прямого излучения распространены значительно больше, чем рупорные.

Воспроизведение широкой полосы частот может быть осуществлено с помощью одной головки, называемой широкополосной, либо двумя или большим числом узкополосных головок, излучающих звуковые колебания различных частей широкой полосы частот. В за-

висимости от полосы воспроизводимых частот головки прямого излучения называют низкочастотными, среднечастотными и высокочастотными, последние некоторые радиолюбители называют «пищалками». Громкоговоритель, в котором использованы две и большее число узкополосных головок, называют также акустической системой (соответственно двух- и трехполосной).

Электродинамические головки громкоговорителей различают по номинальной электрической мощности, сопротивлению звуковой катушки, конструктивным и эксплуатационным признакам. К конструктивным признакам относятся: устройство излучателя звуковых колебаний (один диффузор или два, одна звуковая катушка или две, одиночная или спаренная головка), устройство магнитной системы, форма диффузора — круглая или овальная.

К эксплуатационным признакам относятся температурные, климатические условия работы и влагостойкость головок.

Условное обозначение головки или громкоговорителя имеет следующее значение: первое число указывает номинальную электрическую мощность; буквы ГД означают: головка громкоговорителя динамическая, КЗ — колонка звуковая; МАС — малая акустическая система; второе число является номером разработки головки (громкоговорителя); третье число указывает значение частоты механического резонанса, подвижной системы головки. Головки и громкоговорители, предназначенные для работы в тропических условиях, имеют в конце обозначения букву Т.

Наиболее распространенным акустическим оформлением громкоговорителей с электродинамическими головками прямого излучения (в том числе и громкоговорящих малогабаритных приемников) является закрытый ящик; на втором месте стоит фазоинвертор и на третьем — лабиринт и рупор.

Стационарные монофонические радиолы, магнитофоны и некоторые электрофоны оформляют в открытых ящиках. Закрытый ящик и фазоинвертор завоевывают все больше симпатий. Так, в 1969 г. закрытый ящик был акустическим оформлением приблизительно у 45% зарубежных громкоговорителей, а фазоинвертор у 15%; в 1973 г. распространенность этих типов оформления увеличилась соответственно до 54 и 28%.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ГОЛОВОК ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЯМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ[1]

Принцип работы электродинамической головки громкоговорителя основан на взаимодействии магнитного поля проводника с током и постоянного магнитного поля. Заключается он в следующем: если

[1] Наряду с полным наименованием такого электроакустического устройства: «головка громкоговорителя электродинамическая прямого излучения» дальше будем применять сокращенные ее названия: «электродинамическая головка прямого излучения», «головка прямого излучения» и даже «головка».

Громкоговорителем будем называть головку (или несколько головок) в акустическом оформлении. Вместе с тем громкоговоритель, содержащий две или большее число головок, будем называть «акустической системой».

в магнитное поле, образованное полюсами магнита, помещен проводник, по которому проходит электрический ток (рис. 2), то на проводник будет действовать механическая сила, называемая электродинамической. Эта сила стремится вытолкнуть проводник из магнитного поля в направлении, перпендикулярном силовым линиям поля и направлению тока (правило левой руки).

При указанном на рис. 2 направлении тока силовые линии магнитных полей проводника и магнита направлены над проводником в противоположные стороны, а под ним совпадают по направлению.

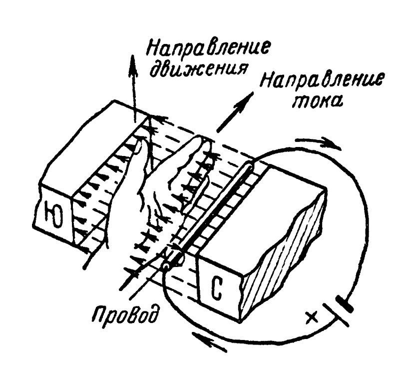


Рис. 2. Возникновение электродинамической силы.

Рис. 3. Одна из распространенных конструктивных разновидностей электродинамической головки прямого излучения.

При этом над проводником магнитное поле ослаблено, а под проводником усилено, что приводит к появлению силы, стремящейся сместить проводник вверх, в зону ослабления магнитного поля. Если протекающий по проводнику ток будет переменным, то сила, выталкикивающая проводник, будет изменять свое направление с частотой переменного тока и проводник будет совершать колебания в магнитном поле с той же частотой.

Одна из распространенных конструкций электродинамических головок прямого излучения показана на рис. 3. Постоянный магнит *1* создает магнитное поле в зазоре между керном *2* и передним фланцем *3*. В этом зазоре находится цилиндрическая звуковая катушка *4*, жестко соединенная с диффузором *5*. Звуковая катушка располагается точно посередине кольцевого зазора благодаря наличию центрирующей шайбы *6*, приклеенной к диффузору вблизи места его соединения со звуковой катушкой. Зазор между фланцем и катушкой и керном составляет 0,15—0,3 мм. Края диффузора и центрирующей шайбы прикреплены к диффузородержателю *7*, имеющему прорези (окна). Звуковая катушка вместе с диффузором и центрирующей шайбой образуют подвижную систему головки. Колебания диффузора возбуждают в окружающем воздушном пространстве звуковые волны, воспринимаемые человеческим ухом как звуки.

Сила взаимодействия магнитного поля переменного тока, протекающего по звуковой катушке, и постоянного поля магнита F пропорциональна магнитной индукции B в кольцевом зазоре, длине проводника звуковой катушки l и току I, т. е.

$$F = BlI.$$

Здесь B — в веберах на квадратный метр*, l — в метрах, I — в амперах. С другой стороны, согласно закону Ньютона сила F равна произведению массы m на ускорение a. Это означает, что при неизменном значении переменного тока в звуковой катушке последняя вместе с диффузором, имеющим массу m, будет колебаться с постоянным колебательным ускорением $a=F/m$. Отсюда следует, что чем меньше масса диффузора и звуковой катушки, тем с бóльшим ускорением они будут колебаться (при тех же длине провода обмотки катушки и значении тока). Это важно потому, что звуковое давление, создаваемое головкой в полосе частот, лежащих выше основной резонансной частоты, до частоты, при которой диффузор перестает колебаться как одно целое (как поршень), пропорционально колебательному ускорению диффузора. Следовательно, звуковое давление, создаваемое головкой, пропорционально току в звуковой катушке и приближенно напряжению сигнала. Частота, при которой поверхность диффузора перестает колебаться синфазно и разделяется на отдельные участки, колеблющиеся с различным фазовым сдвигом между ними и различными амплитудами, называется **критической частотой головки** $f_{кр}$:

$$f_{кр} = c/(\pi D_{д.эф}),$$

где c — скорость звука в воздухе, м/с; $D_{д.эф}$ — эффективный диаметр излучающей части диффузора, м (см. стр. 63).

Подставив в это выражение значение скорости звука и выразив диаметр диффузора в сантиметрах, получим:

$$f_{кр} = 1,1 \cdot 10^4/D_{д.эф}.$$

Подвижная система головки, обладающая определенной массой и гибкостью, представляет собой резонансную систему, частота резонанса которой в герцах определяется выражением

$$f_р = \frac{1}{2\pi \sqrt{mc_п}},$$

где m — масса подвижной системы и соколеблющаяся с диффузором (присоединенная) масса воздуха, кг; $c_п$ — гибкость подвижной системы, м/Н.

Следовательно, чем больше масса и гибкость подвижной системы, тем ниже резонансная частота. Гибкость подвижной системы определяется гибкостями центрирующей шайбы и подвеса диффузора; гибкость подвеса диффузора обычно больше, чем гибкость центрирующей шайбы. Масса подвижной системы в основном складывает-

* 1 Вб/м^2=10^4 Гс.

ся из масс звуковой катушки, диффузора и присоединенной массы воздуха (реактивная часть сопротивления излучения). Последняя зависит от диаметра излучающей части диффузора, и ее значение в граммах может быть определено из выражения

$$\Delta m = 8 \cdot 10^{-4} D^3_{\text{д.эф}},$$

где $D_{\text{д.эф}}$ — эффективный диаметр диффузора, см.

При воспроизведении сигнала с частотой, близкой или равной частоте основного резонанса подвижной системы головки громкоговорителя, и неизменном значении тока в звуковой катушке амплитуда колебаний диффузора увеличивается и звуковое давление на этих частотах повышается.

Магнитная система. Амплитуда колебаний диффузора, как указывалось ранее, зависит от значения магнитной индукции B в кольцевом зазоре, где расположена звуковая катушка. Вместе с тем значение B зависит от конструкции деталей магнитной системы и качества постоянного магнита. Магнитная система динамической головки прямого излучения состоит из магнита и магнитопровода. Магнит обычно имеет форму кольца *1* (рис. 4, *а, г*) или керна *3* (рис. 4, *б, в*). Кольцевые магниты отливают из никель-алюминиевых сплавов (типа «альни») с присадками других материалов, например из сплава марки ЮНД4, содержащего 25% никеля, 15,5% алюминия, 4% меди и 55,5% железа. Чтобы кольцевой магнит создал достаточно большую магнитную индукцию в зазоре, он должен иметь относительно большие объем и массу. Керновые магниты имеют меньшие размеры и массу, так как их изготовляют из более высококачественных никель-алюминиево-кобальтовых сплавов с примесями других дорогих металлов — ЮНДК24, ЮНДК25БА и др. В состав сплава ЮНДК24 входят: 24% кобальта, 14% никеля, 9% алюминия, 4% меди, 0,3% титана и 48,7% железа. Магнитная энергия, которой определяется качество магнитного материала, у сплава ЮНДК24 приблизительно в 3,5 раза больше, чем у сплава ЮНД4, а у сплава ЮНДК25БА почти вдвое больше, чем у сплава ЮНДК24. Чем выше магнитная энергия сплава, тем меньшего объема может быть сделан магнит. Это позволяет уменьшить массу и габариты головки.

Магнитопровод выполняют закрытым — в виде стакана *4* (рис. 4, *б*) или открытым — в виде скобы *5* (рис. 4, *в*). Вследствие трудности изготовления магнитного керна с концом нужного диаметра и с минимальными допусками, на торцовой части керна укрепляют клеем БФ-2 круглую стальную пластинку, толщина которой равна толщине переднего фланца *2*. Пластинка и круглое отверстие фланца образуют кольцевой зазор.

Магнитная система с керновым магнитом имеет значительно меньшее внешнее поле рассеяния. Это очень важно для головок, применяемых в телевизорах и радиоприемниках с внутренними магнитными антеннами; головки с кольцевыми магнитами там не могут использоваться.

Высокая стоимость кобальта и сложность технологии изготовления литых магнитов привели к появлению прессованных магнитов из феррита бария[1]. Применяемые в динамических головках громко-

---

[1] Феррит бария относится к числу магнитотвердых ферритов; он представляет собой смесь порошка окислов бария и окислов железа ($BaO_6 \cdot Fe_2O_3$).

говорителей магниты из феррита бария марок 2БА и 3БА превосходят по магнитной энергии магниты из сплава ЮНД4, существенно дешевле и легче их. Прессованные магниты изготовляют только кольцевого типа — в виде относительно тонких и широких шайб (рис. 4, *г*). Поскольку высота магнитной системы мала, ее магнитное сопротивление также невелико. Фланец *2* и керн *3* изготовляют из мягкой стали, например, типа армко.

Кривая изменения магнитной индукции по высоте кольцевого зазора должна быть симметрична относительно середины зазора по высоте. Если это условие не выполняется, возникают существенные нелинейные искажения. Они тем больше, чем менее симметрична кривая изменения магнитной индукции в зазоре. Большинство магнитных систем, используемых в широкополосных головках, содержит еще одну важную деталь — цилиндрик или колпачок из меди или латуни, укрепленный неподвижно на керне вблизи звуковой катушки. Эта деталь представляет собой короткозамкнутый виток, индуктивно связанный со звуковой катушкой и уменьшающий ее индуктивное сопротивление на высших частотах. В результате полное электрическое сопротивление головки растет с увеличением частоты не столь быстро. Уменьшается спад потребляемого ею электрического тока на частотах выше 1 кГц. Это приводит к повышению уровня излучаемой акустической мощности на 10—15 дБ в области высших частот.

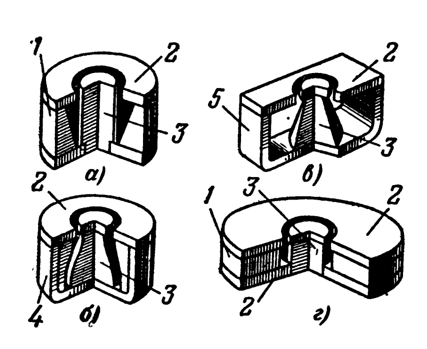


Рис. 4. Конструкции магнитных систем электродинамических головок.

Звуковая катушка. Звуковую катушку наматывают медным или алюминиевым проводником в эмалевой изоляции на каркасе из плотной бумаги (в маломощных головках) из алюминия, меди, а также пластмассы (в мощных головках). Число слоев обмотки всегда четное, чтобы выводы катушки были с одной стороны; чаще всего обмотка имеет 2 или 4 слоя. Согласно ГОСТ 9010-73 модуль полного электрического сопротивления звуковой катушки на частоте 1 кГц должен иметь одно из следующих номинальных значений: 2; 4; 8; 15; 25; 50; 100; 400; 800 Ом. Благодаря хорошему отводу тепла допускается большая плотность тока в обмотке — 30—90 А/мм².

Витки обмотки склеивают между собой и с каркасом клеем БФ-4 или АК-20. Для этого проволоку при намотке пропускают через сосуд с клеем. Выводы обмотки приклеивают к каркасу и диффузору, а их концы припаивают к установленным на диффузоре пустотелым заклепкам или скобкам. К последним припаивают гибкие и прочные проводники, другие концы которых присоединяют к выводным контактам головки, расположенным на диффузородержателе.

Для уменьшения нелинейных искажений звуковая катушка должна быть установлена симметрично по высоте зазора. С этой же

целью высоту звуковой катушки делают больше или меньше высоты кольцевого зазора. Нелинейные искажения возникают, когда осевые колебания звуковой катушки совершаются в неоднородном магнитном поле, так как при этом электродинамическая сила изменяется не только от изменения звукового сигнала (тока в катушке), но и от ее положения по высоте зозора. Обычно за краями кольцевого зазора магнитное поле сильно уменьшается; поэтому если высота катушки равна высоте зазора, то при ее движении пронизывающий ее магнитный поток будет уменьшаться тем больше, чем больше она будет

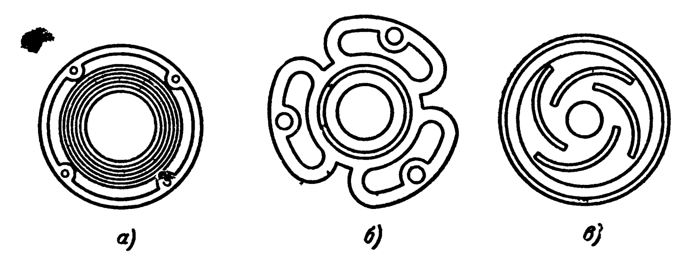


Рис. 5. Конструкции центрирующих шайб.

а, б — внешние; *в* — внутренняя.

выходить из зазора. В случаях, когда высота катушки больше или меньше высоты зазора, катушка совершает осевые перемещения в неизменном магнитном поле (т. е. сохраняется постоянным среднее значение магнитной индукции).

Однако оба эти конструктивные решения невыгодны. При первом увеличивается масса катушки и уменьшается чувствительность головки. При втором не полностью используется энергия магнита и уменьшается мощность головки, а для ее сохранения требуется увеличивать габариты и массу головки. Поэтому чаще высоту звуковой катушки делают немного больше высоты зазора, чтобы при выходе части витков в более слабое поле, по одну сторону зазора, на другой его стороне такая же часть витков входила в более сильное поле внутри зазора.

Центрирующая шайба. Правильное положение звуковой катушки по ширине магнитного зазора обеспечивается центрирующей шайбой. Ее жесткость в радиальном (поперечном) направлении значительно больше, чем в осевом (продольном). Поперечная жесткость важна для стабильной установки звуковой катушки в магнитном зазоре, так чтобы она не соприкасалась ни с керном, ни с фланцем. Большая осевая гибкость необходима для получения достаточно низкой частоты основного резонанса подвижной системы головки. Если частота основного резонанса сравнительно высока (например, у высокочастотной головки), осевая жесткость центрирующей шайбы также может быть увеличена.

Применяют гофрированные (рис. 5,*а*) или паучковые (рис. 5, *б*) центрирующие шайбы. Первые, получившие у нас наибольшее распространение, имеют концентрические гофры разнообразного профиля с числом рядов, равным 2—5. Гофры изготовляют из пропитанной бакелитовым или цапонлаком хлопчатобумажной или шелковой ткани, а также из бумаги.

Бумажные шайбы применяют только в головках с номинальной мощностью до 0,5 Вт. Гофрированная поверхность бумажной шайбы заканчивается плоским кольцом, которым ее приклеивают к диффузородержателю или к жесткой переходной детали, а последняя соединяется с диффузородержателем.

Паучковые центрирующие шайбы штампуют из тонкого текстолита. В большинстве головок центрирующая шайба расположена с внешней стороны диффузора (рис. 5, *а*, *б*), однако она может быть расположена и внутри диффузора (рис. 5, *в*). В последнем случае

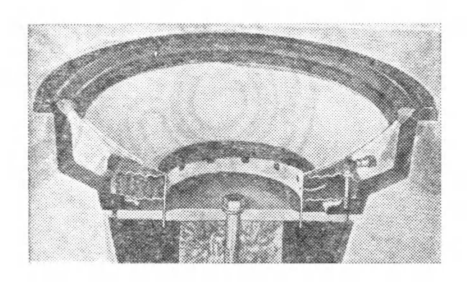


Рис. 6. Подвижная система электродинамической головки с двухъярусной центрирующей шайбой.

шайбу прикрепляют центральной частью к керну. Внутренняя центрирующая шайба не допускает больших перемещений звуковой катушки без нарушения линейности ее упругости. Поэтому ее применяют только в маломощных и высокочастотных головках, у которых перемещения звуковой катушки малы.

Довольно часто, особенно в головках большой мощности, центрирующую шайбу устанавливают на переднем фланце магнитной системы. При этом в некоторых мощных головках для увеличения поперечной жесткости подвижной системы центрирующую шайбу делают двухъярусной (рис. 6).

Диффузор. Диффузор является излучающим элементом головки громкоговорителя и в значительной степени определяет ее основные электроакустические характеристики. Как одно целое (как поршень) диффузор колеблется только в области низших частот; на средних и высших частотах различные участки поверхности диффузора колеблются с различными амплитудами и фазами, в результате чего на частотной характеристике головки появляются пики и провалы. Обычно диффузор имеет коническую форму; широко применяют круглые

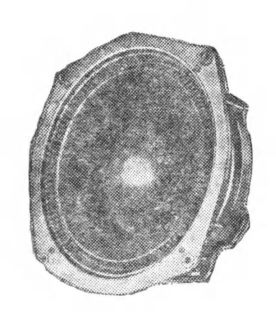


Рис. 7. Разновидность краевого гофра в низкочастотной головке фирмы Hitachi.

и овальные (эллиптические) диффузоры. У последних к вершине конуса, где к нему прикреплен каркас звуковой катушки, овал переходит в круг. Овальная форма диффузора не улучшает электроакустические параметры головки, а лишь делает более удобным размещение ее в ящике телевизора, магнитофона, некоторых типов приемников.

Диффузоры штампуют из цельных листов бумаги или отливают из бумажной массы. Для изготовления последней используют сульфатную и сульфитную целлюлозу, древесную массу, хлопок-линтер, иногда шерсть и другие компоненты. Бумажную массу тщательно размалывают и окрашивают анилиновой краской. Затем автоматически действующий механизм опускает в чан с бумажной массой форму из тонкой сетки, соответствующую форме диффузора. На сетку осаждается слой бумажной массы определенной толщины. После этого воду из-под сетчатой формы отсасывают. Уплотнившаяся бумажная масса становится диффузором. Находящийся на сетке диффузор сушат, сняв с сетки опрессовывают, опрыскивают лаком, снова сушат и обрезают. Диффузоры имеют толщину от 0,1 мм в миниатюрных головках и до 0,4 мм в головках номинальной мощностью 5—10 Вт.

В некоторых зарубежных головках применяют диффузоры из полимеров и пенопласта, армированного с двух сторон алюминиевой фольгой, а также из легкого металла — титана. Диффузор из полистирольного пенопласта имеет головка 3ГД-17.

Край диффузора (основание конуса) имеет концентрические гофры, которые переходят в плоский воротник, приклеиваемый к диффузородержателю. Концентрические гофры, называемые подвесом диффузора, дают ему возможность совершать осевые перемещения. Гибкость гофров всегда больше, чем гибкость центрирующей шайбы. Большинство диффузоров имеет по 2—3 ряда гофров; существует много видов профилей гофров. Основным требованием к гофрам является необходимая гибкость подвеса и сохранение линейности его упругих свойств при всех, допустимых нормальной нагрузкой перемещениях подвижной системы головки; это способствует уменьшению нелинейных искажений.

В низкочастотных головках фирмы «Hitachi» (Япония) для получения наибольшей гибкости и линейности подвеса применен широкий кольцевой гофр со 120 поперечными складками (рис. 7).

Важное значение в устранении нежелательных призвуков и улучшении частотной характеристики головки имеет характер сопряжения крайнего гофра с плоским воротником; влияние характера сопряжения на частотную характеристику головки иллюстрирует рис. 8.

В последнее время в диффузорах низкочастотных головок вместо кольцевого гофра иногда применяют воротник из специального сорта резины; на рис. 9 показана низкочастотная головка 10ГД-30 Бердского радиозавода с подобным воротником. В головках старых типов широко использовали воротники из дугообразных полосок тонкой кожи или другого гибкого материала. С помощью такого воротника можно восстановить поврежденный диффузор головки при отсутствии запасного.

Наряду с резиновым воротником широко используют пропитку или покрытие кольцевого гофра специальным составом, повышающим его гибкость и прочность. В частности, такое покрытие кольцевого гофра применено в низкочастотной головке 6ГД-2 Рижского

радиозавода имени А. С. Попова. Такую обработку гофра применяют нередко и с целью демпфирования подвижной системы головки, чтобы улучшить ее частотную и переходную характеристики (подробнее — см. стр. 34). В головках отечественного производства с 1968 г. для пропитки гофра применяют состав БАВ.

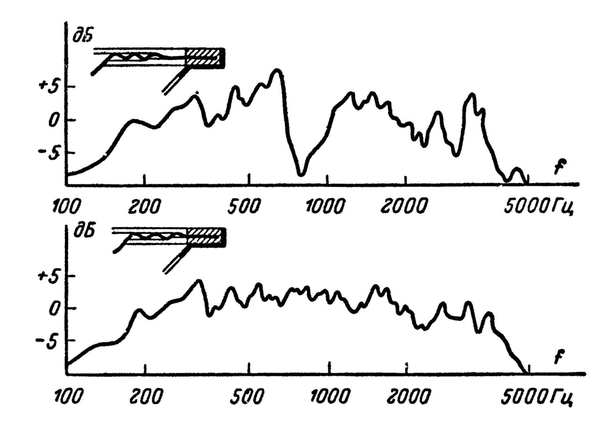


Рис. 8. Влияние сопряжения гофра с воротником диффузора на частотную характеристику головки.

Влияние демпфирующей пропитки кольцевого гофра диффузора головки фирмы Lorenz (ФРГ) иллюстрирует рис. 10, на котором представлена графически зависимость уровня звукового давления N_p, создаваемого головкой, от частоты f подводимого к ее звуковой катушке сигнала (частотная характеристика) без пропитки и с пропиткой гофра.

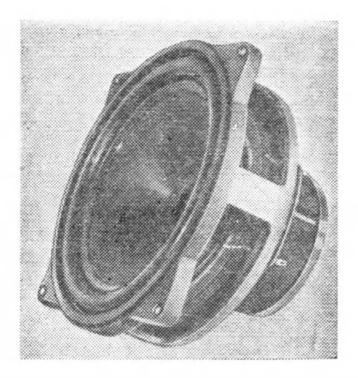


Рис. 9. Низочастотная головка 10ГД-30.

Для хорошего воспроизведения высших звуковых частот диффузор должен быть жестким и иметь относительно небольшую массу. Чтобы диффузор обладал достаточной жесткостью, ему обычно придают коническую форму с углом раскрытия 100—130°. При большем угле раскрытия диффузор оказывается недостаточно жестким, а при меньшем — слишком тяжелым, так как при этом увеличивается его глубина. Жесткость конической части диффузора можно увеличить применением целлюлозы более жестких сортов и пропиткой лаком части диффузора, прилегающей к звуковой катушке. Фирма Sony (Япония) для

увеличения жесткости диффузоров ввела в их состав волокна углерода марки Т-300А (громкоговоритель типа SS8150). Это улучшило частотную характеристику и увеличило динамический диапазон громкоговорителя.

Изгибная жесткость диффузора, особенно вблизи гофра, важна также для устранения возможности возникновения призвуков (унтертонов), возникающих при некотором пороговом значении электрического сигнала. Призвуки создаются продольным изгибом диффузора под действием составляющей электродинамической силы, направленной вдоль оси диффузора. Эти паразитные колебания

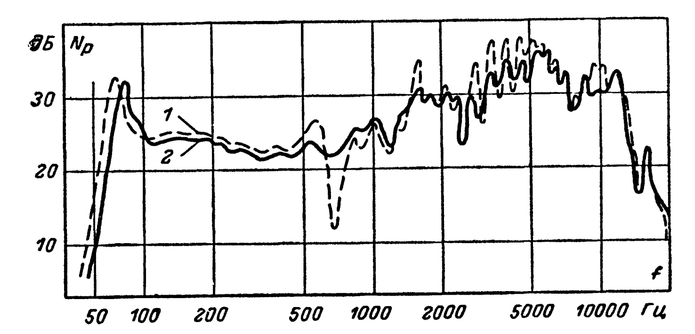


Рис. 10. Влияние демпфирующей пропитки краевого гофра на частотную характеристику.

1 — гофр без пропитки; *2* — с пропиткой.

называют субгармоническими, так как частоты их вдвое меньше частот подводимого звукового сигнала; возникают они на частотах 500—3000 Гц. Для борьбы с этим неприятным явлением диффузоры мощных громкоговорителей делают с криволинейной образующей (рис. 11, *а*); такой диффузор может прогибаться только в одну сторону — в сторону имеющегося изгиба — и поэтому опасность возникновения колебаний на частотах, равных половине частоты подводимого сигнала, сильно ограничена. В настоящее время диффузоры с прямолинейной образующей применяют, как правило, только в головках небольшой мощности.

Для улучшения воспроизведения составляющих высших звуковых частот в широкополосных головках часто применяют дополнительный диффузор (конус) с меньшим углом раскрытия; его прикрепляют вершиной к вершине основного диффузора. Второй диффузор, будучи жестче и легче, лучше воспроизводит высшие частоты, повышая верхнюю границу полосы воспроизводимых частот.

Представление о конструкции двойного диффузора дает рис. 12, на котором показана широкополосная головка Solo (25 Гц — 15 кГц) завода громкоговорителей в Благоевграде (НРБ). В громкоговорителях мощностью 5 Вт и выше иногда применяют диффузоры с кольцевой гофрировкой (рис. 11, *б*), у которых благодаря гибкости гофра часть диффузора, прилегающая к его основанию на высших частотах, как бы отключается. При этом масса подвижной системы уменьшается и тем самым улучшается воспроизведение составляющих высших частот.

Диффузородержатель. Диффузородержатель объединяет в одно целое подвижную и магнитную системы головки. Он предназначен для установки в нем диффузора, элементов подвижной системы и крепления головки в акустическом оформлении. Для повышения жесткости и механической прочности верхний край диффузородержателя имеет отбортовку, этим краем головка прикрепляется к панели акустического оформления. Ребра или канавки (зиги) на поверхности диффузородержателя также увеличивают его жесткость.

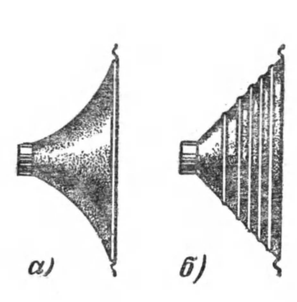


Рис. 11. Диффузор с криволинейной образующей (*а*) и с кольцевыми гофрами (*б*).

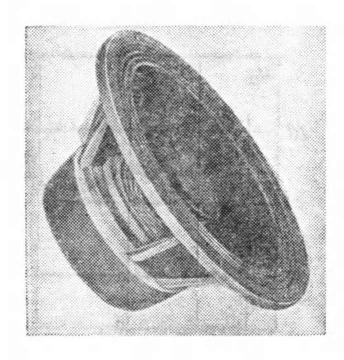


Рис. 12. Широкополосная головка «Solo» с дополнительным диффузором.

Диффузородержатели обязательно имеют большие боковые прорези (окна). Уменьшая массу головки, они вместе с тем устраняют замкнутый объем воздуха, который мог бы образоваться в диффузородержателе без окон и ухудшить частотную характеристику головки, особенно в области низших частот.

Очень важно, чтобы была обеспечена параллельность между плоскостями диффузородержателя, к которым укреплен воротник диффузора, центрирующая шайба и передний фланец магнитной системы. К этому фланцу диффузородержатель прикрепляют заклепками или винтами, реже при помощи сварки.

Диффузородержатели изготовляют преимущественно из стали глубокой вытяжки (конструкционная сталь), твердых сортов алюминия или отливают из силумина (сплав алюминия с кремнием). Значительно реже делают диффузородержатель из пластмассы. Любая конструкция диффузородержателя должна обеспечить механическую прочность головки. Диффузородержатель не должен создавать призвуков при работе головки. В последнее время для удобства крепления головок в некоторых видах акустического оформления (закрытый ящик, фазоинвертор, лабиринт) конструкция диффузородержателей подверглась некоторому изменению: плоская наружная часть диффузородержателя расширена, что позволяет укреплять головку с передней стороны панели, а не с задней, как обычно, без дополнительных приспособлений. Представление о таком диффузородержателе дают головки, показанные на рис. 7 и 9.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОВОК И ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Головки громкоговорителей характеризуются рядом параметров, определяющих их качество и эффективность работы. Основными из них являются: номинальная (электрическая) мощность, основная частота механического резонанса подвижной системы, модуль полного электрического сопротивления, частотная характеристика по звуковому давлению, среднее стандартное звуковое давление, коэффициент гармоник и коэффициент полезного действия (к. п. д.). Знание этих параметров позволяет определять пригодность головок для тех или иных целей, правильно согласовывать их с усилительным устройством и внешним оформлением, а также сравнивать отдельные типы головок.

Номинальная мощность. Наибольшая подводимая к головке электрическая мощность ограничена значением, при котором коэффициент гармоник не превышает нормы, установленной ГОСТ или техническими условиями на головку (обычно не более 5—10% на частотах 100—200 Гц). Этот параметр называют номинальной мощностью; выражают ее в ваттах. Номинальную мощность обязательно указывают в паспорте или другом сопроводительном документе на головку.

Модуль полного электрического сопротивления $|Z_г|$ представляет собой отношение эффективного значения напряжения на выводах звуковой катушки головки к эффективному значению протекающего в ней тока. Оно определяется активным сопротивлением и индуктивностью звуковой катушки, а также вносимым в ее электрическую цепь сопротивлением, обусловленным механическим сопротивлением подвижной системы, включая сопротивление излучения. Типичная частотная характеристика модуля полного сопротивления электродинамической головки прямого излучения показана на рис. 13. Максимум в области низших частот соответствует частоте основного резонанса подвижной системы. Плавное возрастание электрического сопротивления на высших частотах обусловлено индуктивностью звуковой катушки. Минимальное значение модуля полного сопротивления равно активному сопротивлению звуковой катушки. Очевидно, что вследствие резкого увеличения модуля полного сопротивления на частоте основного резонанса потребляемая громкоговорителем на этой частоте мощность $P=U^2/|Z_г|$ при неизменном подводимом напряжении U значительно уменьшается.

Частотная характеристика модуля полного сопротивления головки позволяет более точно определить частоту основного резонанса подвижной системы, установить оптимальную величину нагрузки выходного каскада усилителя и параметры разделительного фильтра (см. стр. 101). Из приведенной частотной характеристики следует, что при расчете нагрузки усилителя нельзя принимать только активное сопротивление звуковой катушки. Средним значением модуля полного сопротивления будет его значение на частоте 1,5 или 2,5 кГц. (в зависимости от высшей граничной частоты номинального диапазона частот).

Во избежание увеличения искажений нежелательно увеличивать и уменьшать сопротивление нагрузки используемого усилителя по сравнению с его номинальным значением. Поэтому при выборе сопротивления нагрузки следует учитывать, что модуль полного сопротивления головки зависит от частоты.

При расчете разделительного фильтра (см. стр. 103) принимают среднее значение модуля полного сопротивления головки в полосе прозрачности фильтра, через который она подключена к усилителю.

Частотная характеристика модуля полного сопротивления и частота основного резонанса в некоторой степени зависят от внешнего оформления громкоговорителя. Если громкоговоритель содержит больше одной головки и разделительные фильтры, то при расчете полного электрического сопротивления громкоговорителя принимают

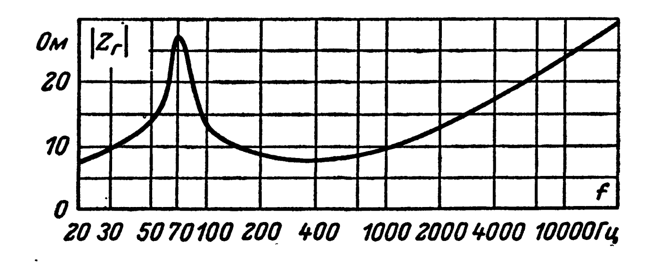


Рис. 13. Типичная частотная характеристика модуля полного сопротивления электродинамической головки прямого излучения.

во внимание сопротивления всех этих элементов, т. е. головок и фильтров.

Среднее стандартное звуковое давление. Для единства измерений и удобства сравнения между собой различных громкоговорителей определяют так называемое стандартное звуковое давление; единицей его измерения является паскаль (Па)[1]. Средним стандартным звуковым давлением считают среднеквадратичное значение звуковых давлений, развиваемых головкой (громкоговорителем) в ее номинальной рабочей полосе частот на акустической оси на расстоянии 1 м от акустического центра[2], при подведении к звуковой катушке неизменного на всех частотах переменного напряжения, соответствующего электрической мощности, равной 0,1 Вт.

Определяют среднее стандартное звуковое давление головки (громкоговорителя) на основе измерения звукового давления на ряде частот, расположенных равномерно внутри номинального частотного диапазона, установленного ГОСТ или техническими условиями на головку данного типа (например, через $^1/_3$ или $^1/_2$ октавы). Измерения проводят на открытом воздухе или в заглушенной акустической камере.

Среднее стандартное звуковое давление является важным показателем эффективности действия головки громкоговорителя. Если звуковое давление измерено на другом расстоянии от громкогово-

[1] Паскаль — давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной на поверхности площадью 1 м^2.

[2] Пояснение терминов «акустическая ось» и «акустический центр» — см. ниже, при описании характеристик направленности головки и громкоговорителя.

рителя l или при другой электрической мощности $P_э$, то нетрудно по этим данным определить значение среднего стандартного давления с помощью формулы

$$p_{ср\ ст} = pl / \sqrt{10P_э} \ .$$

Частотная характеристика. Зависимость уровня звукового давления N_p в децибелах от частоты при неизменном уровне подводимого электрического сигнала называется частотной характеристикой

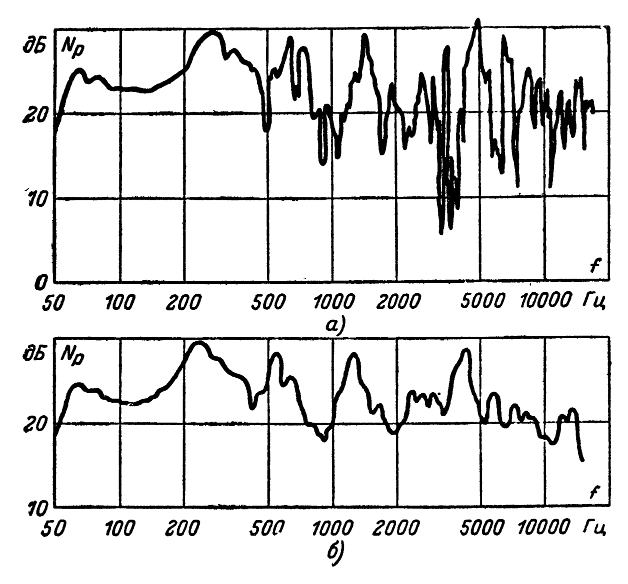


Рис. 14. Частотные характеристики громкоговорителя «Корвет-стерео» по звуковому давлению.

а — действительная; *б* — сглаженная самописцем уровня.

чувствительности головки (громкоговорителя) по звуковому давлению или сокращенно частотной характеристикой.

Чем шире рабочий диапазон частот головки или громкоговорителя и чем меньше разница в уровнях звукового давления на различных участках этого диапазона, тем лучше этот электроакустический преобразователь.

Наглядное представление о частотной характеристике дает графическое изображение (рис. 14, *а*). Как видно из этого рисунка, наблюдается уменьшение уровня звукового давления N_p на нижних и верхних частотах диапазона, а также снижение и увеличение уровня («подъемы» и «провалы») на других частотах.

Все эти отклонения значений звуковых давлений могут быть причиной вносимых громкоговорителем частотных искажений воспроизводимых звуковых программ.

Однако наше ухо не замечает изменений звукового давления, вызываемых острыми пиками и провалами, ширина которых у основания меньше $^1/_8$ октавы. Поэтому при записи самописцем уровня частотные характеристики обычно сглаживаются, принимая вид, подобный изображенному на рис. 14, *б*.

Неравномерность частотной характеристики громкоговорителя определяется разностью между наибольшим и наименьшим уровнем звукового давления в номинальном диапазоне частот. Для динамических головок массового производства допускается неравномерность 12 дБ, т. е. в 4 раза по звуковому давлению. Резкое снижение уровня звукового давления на краях частотной характеристики типично для всех электродинамических головок. Обусловливается оно тем, что излучение заметно ухудшается по мере увеличения длины волны по сравнению с размером диффузора, а на высших частотах диффузор перестает колебаться как единое целое, вследствие чего уменьшается его эффективно излучающая поверхность.

Кроме того, ухудшение воспроизведения составляющих низших звуковых частот вызывается увеличением модуля полного электрического сопротивления головки в области частоты основного резонанса, а ухудшение воспроизведения составляющих высших частот — возрастанием индуктивного сопротивления катушки.

Следует отметить, что воспроизведение звуков низших частот сильно зависит от конструкции и размеров внешнего оформления (щита, ящика, футляра и т. п.), в котором работает головка.

Приведенная на рис. 14, *б* частотная характеристика показывает, что частотный диапазон упомянутого громкоговорителя находится в пределах 50 Гц — 15 кГц при неравномерности 12 дБ, причем уровень звукового давления резко уменьшается на частотах 60 Гц и выше 14 кГц.

Отметим, что чем выше допустимая неравномерность частотной характеристики, тем шире будет оценен ее номинальный диапазон частот. Номинальные диапазоны частот для динамических головок прямого излучения установлены ГОСТ 9010-73 (см. приложение).

Нелинейные искажения. Нелинейные искажения, нарушающие точность звуковоспроизведения, возникают из-за нелинейности амплитудной характеристики головки, т. е. нарушения пропорциональности между значением подводимого к ней электрического напряжения и развиваемым ею звуковым давлением. Нелинейные искажения характеризуются возникновением в воспроизводимом спектре частот новых составляющих, «загрязняющих» звуковую передачу дополнительными призвуками.

Продуктами нелинейных искажений являются гармоники — частоты в 2, 3 и большее число раз выше частоты подводимого сигнала и комбинационные частоты, представляющие собой тоны с частотами $nf_1 \pm mf_2$, где f_1 и f_2 — частоты основных тонов или их гармоник, а n и m — любые целые числа. Паразитные частотные составляющие появляются обычно при больших уровнях сигнала и воспринимаются как звучание с хрипом, дребезжанием и т. п.

В широкополосных головках, выходных трансформаторах и других нелинейных звеньях звуковоспроизводящей системы при одновременной передаче двух и более частот, из которых одна значительно выше других, часто возникают искажения, обусловленные амплитудной модуляцией высокочастотных составляющих низкочастотными. Эти искажения называют интермодуляционными (искажения взаимной модуляции). На рис. 15 показано, какой вид

имеют на экране осциллографа интермодуляционные искажения, создаваемые головкой громкоговорителя при ее перегрузке.

Опасность возникновения интермодуляционных искажений явилась одной из причин применения двухполосных систем, в которых составляющие низших и высших частот воспроизводятся разными головками.

Источником нелинейных искажений в электродинамических головках громкоговорителей является нелинейность гибкости подвесов подвижной системы (т. е. различная гибкость подвесов при разных

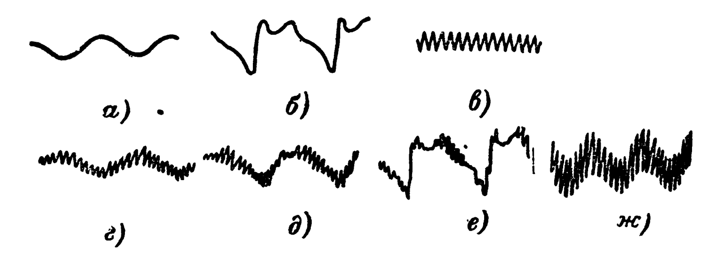


Рис. 15. Осциллограммы звукового давления, создаваемого головкой громкоговорителя.

а — неискаженное воспроизведение тона с частотой 50 Гц при синусоидальном сигнале на звуковой катушке с амплитудой, равной 1 В; *б* — при увеличении напряжения сигнала до 4,5 В кривая искажается; *в* — неискаженное воспроизведение тона с частотой 1 кГц при синусоидальном сигнале на звуковой катушке с амплитудой, равной 1 В; *г—е* — интермодуляция при одновременной подаче на звуковую катушку сигналов с частотами 50 Гц и 1 кГц при увеличении напряжения с частотой 50 Гц до значений 2, 3 и 4,5 В; *ж* — неискаженное воспроизведение двух тонов.

по величине перемещениях звуковой катушки диффузора); она нарушает пропорциональность между электродинамической силой и перемещениями. Другой источник нелинейных искажений — непостоянство магнитной индукции по высоте кольцевого зазора. Эта неоднородность магнитного поля определяется конструкцией магнитной системы, причем величина искажений зависит от высоты звуковой катушки и асимметрии ее положения в зазоре.

При горизонтальном расположении головки с очень низкой частотой основного резонанса (ось диффузора вертикальна) провес звуковой катушки с диффузором способствует увеличению нелинейных искажений. Зависимость провеса подвижной системы в сантиметрах от основной резонансной частоты головки можно определить по формуле

$$x = 25/f_{\text{р}}^2.$$

Нелинейные искажения могут также создаваться нелинейностью упругости воздуха в замкнутом объеме под гофрированной центрирующей шайбой или в закрытом ящике, в котором установлена головка. Наибольшие искажения возникают на низших частотах, особенно на основной резонансной частоте вследствие возрастания амплитуды осевых перемещений подвижной системы с уменьшением частоты сигнала. Это следует из того, что создаваемое электродинамической силой колебательное ускорение подвижной системы го-

ловки $a = F/m$, а поскольку колебательное ускорение, скорость v и перемещение связаны между собой соотношением: $a = \omega v = \omega^2 x = 4\pi^2 f^2 x$, то перемещение

$$x = \frac{F}{(2\pi f)^2 m},$$

т. е. обратно пропорционально квадрату частоты сигнала.

Представление о зависимости коэффициента гармоник от подводимой к головке 4ГД-28 электрической мощности и частоты дает табл. 1.

Таблица 1

Подводимая электрическая мощность, Вт	Частота, Гц									
	63	80	125	200	400	1000	2000	4000	6300	8000
	Коэффициент гармоник, %									
4,0	62	22	3,6	2,8	2,5	3	2,0	1,0	1,5	1,0
3,0	60	18	3,2	1,5	2,5	3	1,5	1,0	1,5	1,0
2,0	55	18	2,8	1,5	2,5	3	1,5	1,0	1,0	1,0
1,0	32	12	2,5	1,5	2,5	3	1,0	1,0	1,0	1,0
0,5	27	7	1,8	1,5	2,5	3	1,0	1,0	1,0	1,0

Приведенная таблица хорошо иллюстрирует сказанное выше: большие искажения получаются на самых низких частотах, наибольшие — на низшей частоте 63 Гц, когда подводимая мощность равна номинальной мощности головки. Вот почему применение более мощной головки с «недогрузкой», т. е. при подаче на нее электрической мощности меньше номинальной, сулит уменьшение нелинейных искажений.

В широкополосных головках с диффузорами, диаметр которых меньше 300 мм, при одновременном воспроизведении звуков низших и высших частот возникают искажения, обусловленные эффектом Допплера. Из-за больших перемещений диффузора на низших частотах происходит частотная модуляция колебаний высших частот. При этом появляются продукты частотной модуляции, что равносильно увеличению искажений. Уменьшение диаметра диффузора при неизменной номинальной мощности головки сопровождается увеличением колебательной скорости диффузора, определяющей частотную модуляцию, и следовательно искажений, обусловленных эффектом Допплера. При уменьшении диаметра диффузора от 300 до 200 мм искажения этого вида возрастают более чем в 6 раз и приблизительно во столько же раз превышают интермодуляционные искажения, не зависящие от диаметра диффузора. Такие искажения можно устранить использованием двухполосной системы звуковоспроизведения с частотой раздела 300—600 Гц и хорошей защитой диффузоров среднечастотной и высокочастотной головок от воздействия излучения низкочастотной головки, если они установлены в общем акустическом оформлении.

Поскольку в настоящее время нет достаточно простого и точного метода определения всех продуктов нелинейных искажений, то нормируют и измеряют только значение коэффициента гармоник (учитывают лишь наличие обертонов). Для практических целей этого достаточно.

Чем больше значение коэффициента гармоник, тем больше искажается тембр звука: появляются дребезжание и другие призвуки; по этой причине коэффициент гармоник раньше называли клирфактором — (фактором дребезжания). ГОСТ 9010-73 устанавливает допустимые значения суммарного коэффициента гармоник для динамических головок с различными номинальными диапазонами частот. Допустимые значения суммарного коэффициента гармоник для широкополосных и низкочастотных головок указаны в табл. 2. Она не содержит данных о допустимых значениях коэффициента гармоник на основных резонансных частотах головок и в непосредственной близости к ним. По-видимому, это обусловлено тем, что суммарный коэффициент гармоник головки на основной частоте существенно зависит от ее акустического оформления.

Таблица 2

Номинальный диапазон частот, Гц	Частота, Гц									
	63	80	125	200	400	630	1000	2000	4000	6300
	Суммарный коэффициент гармоник, %, не более									
100—10 000	—	—	10	7	5	5	5	3	3	—
80—12 500	—	—	10	5	5	5	3	3	3	3
63—5 000	—	15	10	5	5	5	3	3	—	—
63—1 000	—	15	10	5	5	—	—	—	—	—
40—5 000	20	15	10	5	5	5	3	3	—	—
40—2 000	20	15	10	5	5	5	3	—	—	—
40—1 000	20	15	10	5	5	—	—	—	—	—
30—1 000	20	15	10	5	5	—	—	—	—	—

На основе тщательных экспериментальных исследований заметности искажений были выработаны нормы допустимых значений коэффициентов гармоник для четырех классов качества радиовещательных трактов (ГОСТ 11515-75). Эти нормы позволяют установить технические требования к громкоговорителям, являющимся основным источником искажений всякой звуковоспроизводящей установки. Согласно этим нормам на низших частотах допустимы бóльшие нелинейные искажения, чем на высших, а чем шире диапазон воспроизводимых частот, тем меньше должны быть нелинейные искажения. Однако в литературе встречаются указания, что обеспечение минимальных искажений в звуковоспроизводящей установке много важнее для получения хорошего звучания, чем расширение полосы частот ниже 70—100 Гц. К этому можно добавить, что одно не мешает другому: звуковоспроизведение можно улучшать и снижением искажений и уменьшением низшей граничной частоты одновременно, хотя, конечно, последнее осуществить труднее.

Направленность излучения. Этот параметр громкоговорителя характеризует распределение излучаемой им звуковой энергии в озвучиваемом пространстве. Направленность излучения наглядно отобра-

жает диаграмма направленности, построенная в полярных координатах. Она показывает зависимость звукового давления, создаваемого громкоговорителем на некотором постоянном расстоянии от него, от угла между акустической осью громкоговорителя и линией, соединяющей точку пространства, в которой измеряется звуковое давление, с акустическим центром громкоговорителя.

Если громкоговоритель содержит одну головку, то его акустическая ось совпадает с осью диффузора, а излучающий центр — с геометрическим центром симметрии отверстия акустического оформления (за исключением фазоинвертора на его резонансной частоте).

Когда же в громкоговорителе имеется две или большее число однотипных головок, то акустическим центром является центр симметрии всех отверстий акустического оформления; если же головки разнотипны и работают в различных частотных полосах, то акустическим центром считают центр симметрии отверстий, против которых расположены высокочастотные головки. Акустической осью громкоговорителя в этих случаях является прямая, проходящая через акустический центр и перпендикулярная плоскости, в которой расположены излучающие отверстия акустического оформления (ГОСТ 16122-70).

Характеристику направленности громкоговорителя снимают на нескольких частотах, находящихся в пределах его номинального рабочего диапазона, причем создаваемое громкоговорителем в данном направлении звуковое давление выражают в долях значения звукового давления на акустической оси громкоговорителя или же сравнивают эти значения по шкале децибелов.[1]

По характеристике направленности производится определение угла излучения данного громкоговорителя. Этот угол определяется участком характеристики направленности ограниченными точками, в которых звуковое давление снижается до половины максимального значения, т. е. уровень звукового давления уменьшается на 6 дБ.

Чем больше линейные размеры излучающей поверхности источника звука по сравнению с длиной волны, тем острее направленность излучения. Если длина излучаемой звуковой волны велика (низшие частоты), а размеры излучателя меньше этой длины, то источник звука не обладает для этих частот направленностью; его характеристика направленности имеет форму окружности, на высших же частотах (при малых длинах волн) направленность излучателя увеличивается. Это хорошо видно из характеристики направленности головки 35ГД-3 (рис. 16).

Если излучатель звука не симметричен относительно своей акустической оси, то направленность его различна в горизонтальной и вертикальной плоскостях; она больше в плоскости, в которой расположена большая сторона излучателя. Так, если у головки с эллиптическим диффузором вертикально расположена большая ось эллипса, то ее характеристика направленности в вертикальной плоскости будет более узкой, чем в горизонтальной. В большинстве случаев значительная направленность излучения громкоговорителя нежелательна, так как при этом ограничивается пространство, в котором равномерно слышны звуки всей полосы воспроизводимых частот. Обычно при повышении направленности ухудшается воспроиз-

---

[1] За рубежом направленность часто называют дисперсией громкоговорителя.

ведение частот выше 1—2 кГц. Это означает, что прослушивание в стороне от акустической оси громкоговорителя будет сопровождаться ослаблением звучания составляющих высших частот. В результате направленности излучения качество звучания оказывается лучшим для слушателей, находящихся ближе к акустической оси громкоговорителя, и худшим для слушателей, находящихся в стороне от этой оси.

Для воспроизведения музыкальных произведений, особенно исполняемых большими ансамблями, необходимо иметь возможно бо-

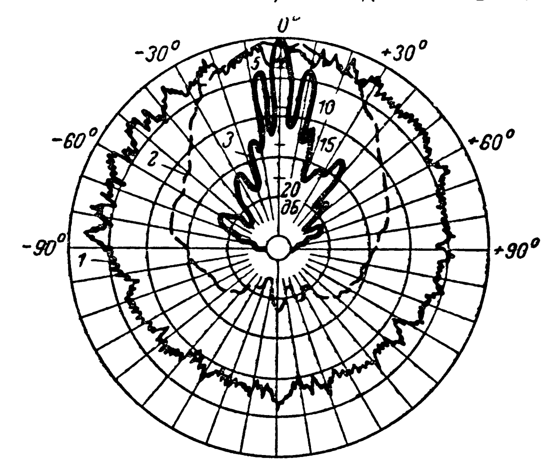


Рис. 16. Характеристики направленности головки прямого излучения 35ГД-3 при различных частотах сигнала.

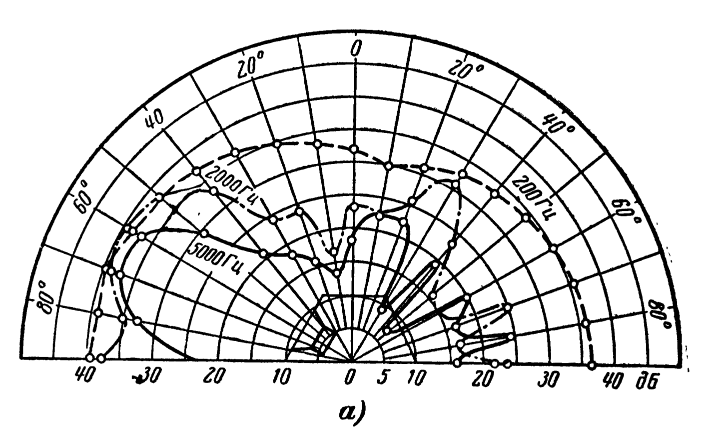
1 — 200 Гц; *2* — 1,6 кГц; *3* — 12,5 кГц.

лее широкую характеристику направленности на высших частотах. Именно расширением диаграммы направленности с помощью нескольких высокочастотных головок, оси которых развернуты в горизонтальной плоскости расходящимися лучами, было достигнуто в 1954 г. объемное звучание (системы 3*D* и 4*R*), сыгравшее значительную роль в улучшении звучания радиоприемников.

В отдельных случаях, например при озвучивании больших площадей и трибун стадиона, направленность излучения громкоговорителей является необходимой. Здесь направленность излучения громкоговорителей позволяет обеспечить более равномерный уровень звука в разных точках озвучиваемой площади и применить усилитель меньшей мощности. Последнее достигается исключением расхода звуковой энергии в направлениях, где отсутствуют слушатели. Направленность излучения громкоговорителей ценна и в звукоусилительных установках, где она способствует ослаблению воздействия громкоговорителей на микрофон и устраняет благодаря этому акустическую обратную связь, приводящую к искажению частотной характеристики и генерации (свисту).

Направленные свойства громкоговорителя влияют и на его частотную характеристику. Форма ее зависит от положения измери-

тельного микрофона относительно акустической оси громкоговорителя. Для иллюстрации этой связи на рис. 17, *а* приведена характеристика направленности, а на рис. 17, *б* — соответствующие двум положениям измерительного микрофона частотные характеристики электродинамической головки, смонтированной в ящике трапецеидальной формы, расположенной на стене (ящик рассчитан на симметричную установку в нем двух громкоговорителей). Из этих характеристик видно, что на частоте 2 кГц и выше направленность излучения сильно обострена. В результате этого частотная характеристика громкоговорителя, измеренная при положении микрофона



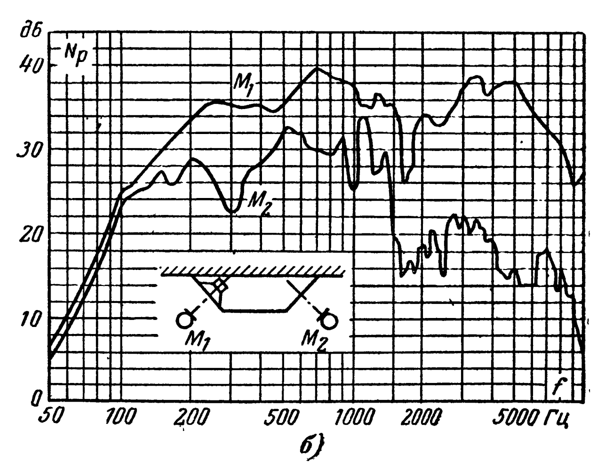


Рис. 17. Характеристики направленности (*а*) и частотные характеристики (*б*) электродинамической головки прямого излучения, установленной в ящике.

приблизительно под углом 120° к акустической оси головки, показывает резкое ухудшение воспроизведения частот выше 1,5 кГц, тогда как на характеристике, измеренной при расположении микрофона на акустической оси головки, такого провала нет.

Характеристика направленности громкоговорителя, содержащего две или несколько однотипных головок, смонтированных в общем футляре, существенно острее характеристики направленности одиночного громкоговорителя, заключенного в этот же футляр.

Направленность излучения является результатом интерференции между звуковыми волнами, создаваемыми различными участками поверхности излучателя, между излучением передней и задней поверхностей излучателя (диффузора) либо между излучением различных громкоговорителей, действующих одновременно. Характеристика направленности громкоговорителя с динамической головкой прямого излучения расширяется с увеличением угла раствора диффузора и с уменьшением плотности его материала.

Коэффициент полезного действия. Эффективность головки громкоговорителя как преобразователя электрической энергии в звуковую определяется ее к. п д., т. е. отношением излучаемой акустической мощности к подводимой электрической. Приближенно к. п. д. динамической головки прямого излучения в процентах может быть выражен формулой

$$\eta = 5,9 \cdot 10^{-4} \frac{B^2 V S_{д}}{\gamma m^2},$$

где B — магнитная индукция в зазоре, Вб/м²; V — объем обмотки звуковой катушки, м³; $S_{д}$ — площадь излучающей поверхности диффузора, м²; m — масса подвижной системы, кг; γ — удельное сопротивление провода звуковой катушки, Ом·м.

При уменьшении размеров головки к. п д. ее, как правило, уменьшается. Происходит это потому, что одновременно уменьшаются площадь поверхности диффузора $S_{д}$, объем провода звуковой катушки V и (часто) индукция в зазоре B Уменьшается и масса подвижной системы m, но это приводит к увеличению к. п. д., однако первые три величины влияют на к. п. д. значительно больше.

Значение к. п. д. громкоговорителей с динамическими головками прямого излучения очень мало, даже у самых лучших и мощных не превышает 1—2%, а большинство громкоговорителей с головками средней мощности имеет к. п. д. 0,2—0,5%. В качестве примера на рис. 18 приведена частотная характеристика к. п. д. широкополосной головки номинальной мощностью 6 Вт, измеренная в третьоктавных полосах шума. Хорошо видно, что в области высших частот ее к. п. д. уменьшается больше чем в 10 раз. Коэффициент полезного действия низкочастотных головок, используемых в малогабаритных акустических системах, еще меньше. Это является следствием уменьшения диаметра диффузора и увеличения массы звуковой катушки, предпринимаемых для понижения основной резонансной частоты. Чтобы скомпенсировать уменьшение звукового давления, сопутствующее снижению к. п. д., к громкоговорителям малогабаритных акустических систем приходится подводить существенно большую мощность.

Измерить к. п. д. громкоговорителя затруднительно, поэтому его эффективность чаще оценивают по значению среднего стандартного звукового давления.

Демпфирование громкоговорителя. Существует еще один показатель громкоговорителя, который пока у нас не нормируется, хотя он влияет на качество звуковоспроизведения: способность громкоговорителя воспроизводить звуки импульсного характера. Эта способность определяется переходными характеристиками громкоговорителя.

Как показали многочисленные исследования, временная структура речи и музыки имеет импульсный характер. Речь, а в значительной степени и музыка представляют собой непрерывный ряд следую-

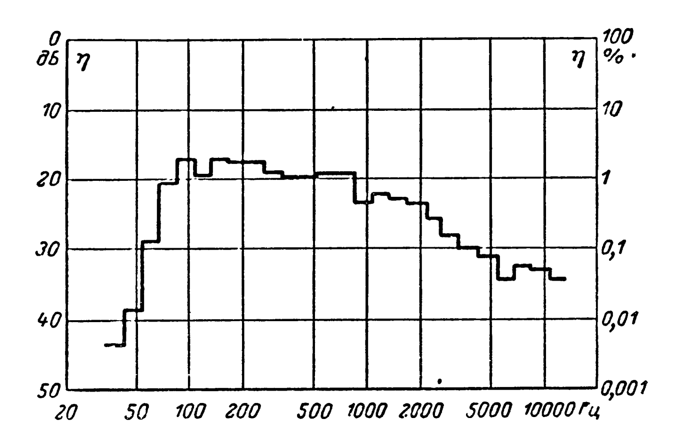


Рис. 18. Частотная характеристика к. п. д. головки прямого излучения 4А-28.

щих один за другим звуковых импульсов различной продолжительности, интенсивности и частоты. Хороший громкоговоритель должен иметь переходные характеристики, обеспечивающие точное преобразование электрического импульса в звуковой, т. е. сохраняющие форму и продолжительность импульса.

Переходные характеристики громкоговорителя зависят от степени электромеханического демпфирования подвижной системы головки, т. е. от тормозящего усилия, вызванного индуктированной в ее звуковой катушке э. д. с., механических потерь (внутреннее трение) в подвижной системе и сопротивления излучения.

Недостаточное демпфирование подвижной системы головки проявляется наличием в частотной характеристике громкоговорителя пиков и провалов, свидетельствующих о том, что система имеет одну или несколько резонансных частот. Высота и ширина пика указывают на степень демпфирования. Чем выше и острее пики и чем глубже провалы, тем меньше затухание колебательной системы. Плохие переходные характеристики громкоговорителя и его неспособность точно воспроизводить электрические импульсы объясняются тем, что подвижная система головки не только смещается электрическим сигналом из положения покоя, но и возбуждается на собственных (резонансных) частотах. Собственные колебания системы возникают как

в начале, так и в конце электрического импульса. Являясь свободными затухающими колебаниями, они могут продолжаться и после прекращения действия импульсов.

При слабом демпфировании затухание собственных колебаний подвижной системы головки продолжается довольно долго — 0,1—0,15 с. Вследствие этого они могут наложиться на следующий звуковой импульс и значительно исказить сигнал; его воспроизведение будет сопровождаться призвуками, отсутствующими в поступающем сигнале.

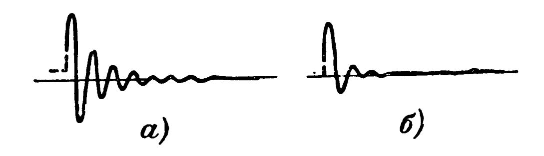


Рис. 19. Осциллограммы затухающих колебаний подвижной системы головки при шунтировании ее звуковой катушки резистором, имеющим сопротивление 70 Ом (*а*) и 18 Ом (*б*).

Время, необходимое для того, чтобы значение поступившего сигнала достигло 90% амплитуды установившегося уровня, называют временем атаки; зависит оно главным образом от частотной характеристики громкоговорителя, меньше от его демпфирования.

Время, требующееся для уменьшения амплитуды колебаний после прекращения сигнала до 10% установившегося уровня, называют временем затухания. Оно полностью зависит от демпфирования; увеличение демпфирования способствует рассеянию запасенной громкоговорителем энергии (в массе подвижной системы, в подвесе и в воздушном объеме ящика).

Существуют следующие способы демпфирования громкоговорителя: электрический, механический и акустический. Электрическое демпфирование основано на индуцировании в движущейся звуковой катушке э. д. с. Вызванный ею ток создает тормозящие усилия, при этом энергия собственных колебаний превращается в тепловую. Чем меньше электрическое сопротивление цепи звуковой катушки, тем больше ток и тем быстрее рассеивается энергия. Именно поэтому с увеличением магнитной индукции в зазоре головки усиливается электрическое демпфирование, так как при этом увеличиваются наведенная в катушке э. д. с. и ток.

Значительное демпфирующее влияние на подвижную систему головки оказывают параметры выходного каскада усилителя. Чем меньше выходное сопротивление усилителя (оно шунтирует звуковую катушку), тем больше значение наведенного тока и тем бóльшая сила торможения создается им. На рис. 19 изображены осциллограммы собственных затухающих колебаний подвижной системы головки при шунтировании ее звуковой катушки резисторами с различными сопротивлениями, эквивалентными выходному сопротивлению усилителя. Осциллограммы эти поясняют, почему применение отрицательной обратной связи, снижающей выходное сопротивление усилителя,

необходимо для улучшения качественных показателей звуковоспроизводящего устройства [1].

Однако увеличение «демпфирующего фактора» усилителя до значения больше десяти не имеет смысла, так как наведенный ток будет ограничивать сопротивление звуковой катушки.

Отметим, что способ соединения (последовательно или параллельно) двух или большего числа однотипных головок теоретически почти не влияет на их взаимное электрическое демпфирование. Это несколько неожиданная особенность легко доказывается рис. 20, на

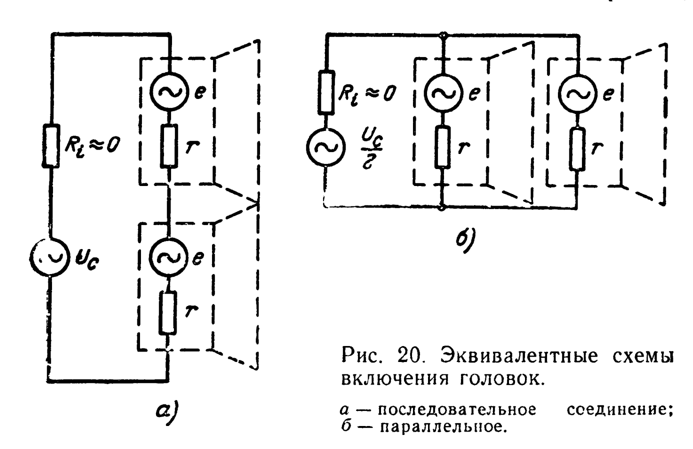


Рис. 20. Эквивалентные схемы включения головок.

а — последовательное соединение; *б* — параллельное.

котором приведены электрические эквивалентные схемы подключения головок к выходу усилителя. Для упрощения объяснения примем, что выходное сопротивление усилителя практически равно нулю. Сила, действующая на звуковую катушку, пропорциональна току. Тормозящее усилие вызывается током i, создаваемым индуцированной в катушке э. д. с. e, и рассматривается в момент прекращения импульса тока от сигнала ($U_c = 0$). Головки включены синфазно, сопротивление звуковой катушки r.

При последовательном соединении головок (рис. 20, *а*) значение индуцированного тока $i = 2e/2r = e/r$, а при параллельном (рис. 20, *б*) в каждой параллельной ветви ток будет иметь значение $i = e/r$, т. е. индуцированные токи в звуковых катушках и, следовательно, демпфирующие усилия одинаковы при обоих способах соединения головок.

Этот вывод справедлив полностью лишь при строгом равенстве основных резонансных частот головок. При их различии может появиться некоторый фазовый сдвиг между индуцированными в катушках э. д. с. и сумма их не будет равна $2e$. Поэтому, когда основные

---

[1] В зарубежной литературе демпфирующие свойства усилителя оценивают его «демпфирующим фактором» D, который определяется как отношение номинальной нагрузки усилителя $R_н$ к его выходному сопротивлению $R_{вых}$, в децибелах, т. е. $D = 20 \lg \frac{R_н}{R_{вых}}$.

резонансные частоты головок не одинаковы или неизвестны, предпочтительнее с точки зрения демпфирования параллельное их соединение.

Если демпфирующий фактор усилителя невысок, то большее демпфирование будет при различных резонансных частотах параллельно соединенных головок. При этом каждая головка на своей резонансной частоте будет шунтирована меньшим сопротивлением.

Механическое демпфирование головки можно осуществить тремя элементами ее конструкции: центрирующей шайбой, подвесом диффузора и самим диффузором. При деформациях подвеса и центрирующей шайбы подводимая механическая энергия превращается в тепло вследствие наличия внутреннего трения в материале шайбы и подвеса. Для увеличения демпфирования подвес пропитывают мастикой. Один из ее составов приведен в польском патенте: мастика состоит из одной массовой части полистирола, 2—3 частей эфирного пластификатора и хлоропарафина с содержанием хлора 37—71%, смешанных в отношении 1 : (1÷2), из 0,1—1,0 части кумароновой смолы с температурой размягчения 40—150°С и из 1—10 частей растворителя.

Демпфирование диффузора увеличением внутреннего трения в его материале способствует ослаблению резонансов на более высоких частотах, когда диффузор перестает колебаться как поршень и разделяется на отдельные колеблющиеся участки. Увеличения внутреннего трения в материале диффузора можно достигнуть соответствующим выбором состава бумажной массы. Акустическое демпфирование представляет собой повышение активного сопротивления нагрузки, оказываемой перемещаемым диффузором воздухом Если эта нагрузка активна, энергия рассеивается в виде звука. Чем выше активная составляющая сопротивления излучения, тем больше акустическое демпфирование Однако на низших частотах, где сопротивление излучения мало, увеличению демпфирования может помочь применение фазоинвертора или увеличение числа головок (см. ниже).

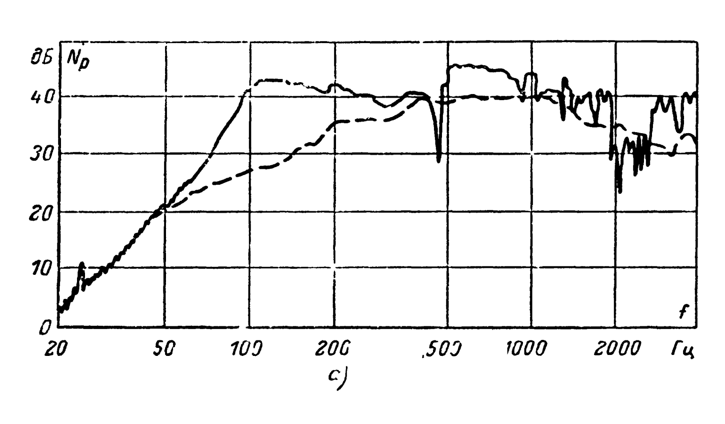
Акустическое демпфирование получается также, если покрыть заднюю сторону головки звукопоглощающим материалом или заполнить ящик громкоговорителя звукопоглотителем, например ватой или очесами. Для того чтобы вата не соприкасалась с диффузором, головку покрывают несколькими слоями марли. Звукопоглощающий пористый материал вносит активное сопротивление (потери) в колебания слоя воздуха, который колеблется вместе с диффузором. Акустическое демпфирование эффективно действует от самых низких звуковых частот до частот 4—5 кГц, улучшая переходные характеристики громкоговорителя и сглаживая его частотную характеристику.

Рисунок 21 иллюстрирует влияние демпфирования на частотную характеристику громкоговорителя в закрытом ящике объемом 80 л с двумя головками 8ГД-РРЗ и осциллограммы воспроизводимых им прямоугольных импульсов с различными частотами заполнения при периоде следования 40 мс. Хорошо видно, как демпфирование сглаживает частотную характеристику и устраняет переходные процессы, улучшая тем самым форму импульсов (пунктирная кривая на рис. 21, *а*).

Однако такое демпфирование обладает существенным недостатком — уменьшает развиваемое головкой звуковое давление в области основного резонанса Для компенсации этого искажения частотной характеристики громкоговорителя частотная характери-

стика усилителя должна иметь подъем в области низших частот и поэтому требуется в 12—15 раз большая выходная мощность, чем при недемпфированном громкоговорителе. Вследствие указанной особенности акустически демпфированных громкоговорителей их используют главным образом в качестве контрольных в студиях звукозаписи и радиовещания.

Заполнение закрытого ящика или части его звукопоглощающим материалом помимо демпфирования увеличивает эффективный объем



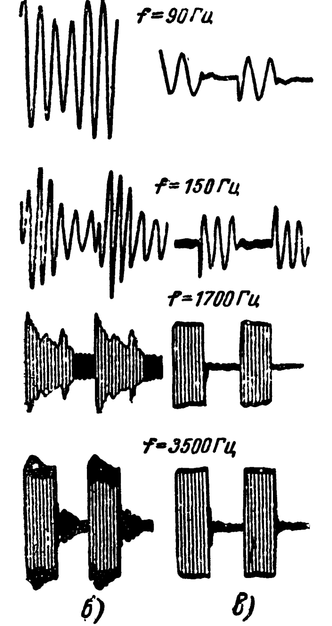


Рис. 21. Частотные характеристики громкоговорителя (*а*) и осциллограммы воспроизведения им прямоугольных импульсов без акустического демпфирования (*б*) и при заполнении ящика ватой (*в*).

в 1,4 раза за счет повышения сжимаемости воздуха (уменьшение жесткости — силы на единицу перемещения диффузора, сжимающего воздух в ящике, эквивалентно увеличению его объема). Процесс сжатия воздуха становится изотермическим вместо адиабатического.

Если звукопоглощающим материалом заполнена только часть объема ящика, например покрыты им только внутренние поверхности, эффективный объем будет состоять из двух частей: увеличенного в 1,4 раза объема звукопоглощающего материала и остального

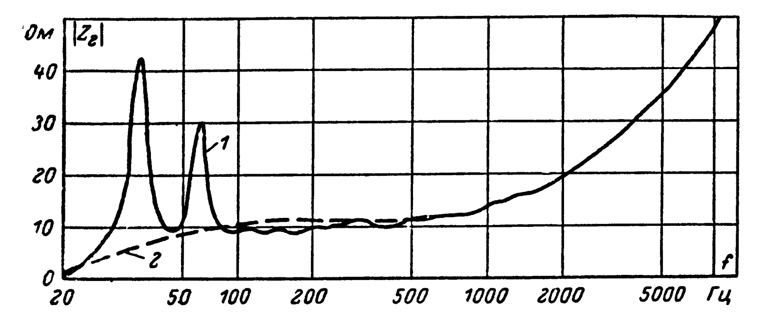


Рис. 22. Частотные характеристики модуля полного сопротивления соединенных последовательно головок 10ГД-18 и 6ГД-1.

1 — в открытом ящике без звукопоглотителя; *2* — в закрытом ящике с ватой.

объема ящика. Увеличение эффективного объема закрытого ящика, как показано дальше, снижает основную резонансную частоту.

Демпфирование громкоговорителя проявляется не только в изменении формы частотной характеристики звукового давления и осциллограмм воспроизводимых звуковых импульсов; оно влияет также на частотную характеристику модуля полного сопротивления $|Z_г|$. Частотные характеристики модуля полного сопротивления соединенных последовательно головок 6ГД-1 и 10ГД-18 до и после заполнения ящика ватой (рис. 22) иллюстрируют связь между значением модуля полного сопротивления в области основного резонанса и звуковым давлением, создаваемым громкоговорителем в этой области частот. Демпфирование основного резонанса резко снижает отдачу головки в этой области частот. Это указывает на то, что уровень звукового давления на низших частотах зависит от добротности Q подвижной системы. Последняя определяется шириной пика в характеристике модуля полного сопротивления громкоговорителя, на уровне 0,7 максимума, т. е. $Q=f_р/\Delta f$.

Добротность головки $Q=\sqrt{km}\,R/(Bl)^2$, где k — упругость подвеса; m — масса подвижной системы; R — сумма активного сопротивления звуковой катушки и выходного сопротивления усилителя; B — магнитная индукция в зазоре; l — длина проводника звуковой катушки.

Добротность $Q>1{,}5$ нежелательна, так как при этом ухудшаются переходные характеристики и частотная характеристика, увеличиваются нелинейные искажения. Последние возрастают вследствие увеличения с повышением добротности амплитуды перемещения звуковой катушки с диффузором при резонансе.

ТИПИЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОВОК ПРЯМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При ознакомлении с конструкциями различных головок следует иметь в виду особенности воспроизведения ими низших и высоких частот.

Излучаемая головкой звуковая мощность (Вт) пропорциональна колебательной скорости диффузора и активной части сопротивления излучения

$$P_{ак} = v^2 r_и = 4\pi^2 f^2 x^2 r_и \cdot 10^{-9} ,$$

где v — колебательная скорость диффузора, см/с; $r_и$ — сопротивление излучения, 10^{-3} Н·с/м; f — частота колебаний диффузора, Гц; x — амплитуда перемещений диффузора, мм.

Сопротивление излучения на низших частотах пропорционально площади поверхности диффузора

$$r_и \approx \frac{\rho\omega^2 S_д}{4\pi c} .$$

Увеличение площади поверхности диффузора приводит к уменьшению осевых перемещений подвижной системы на низших частотах; нелинейные искажения при этом уменьшаются Увеличение площади поверхности диффузора увеличивает его массу, что нежелательно, однако одновременное увеличение площади излучающей поверхности диффузора и массы согласно приведенной выше формуле не уменьшает к. п. д. громкоговорителя. Поэтому низкочастотные головки могут иметь диффузор диаметром до 350 мм и более (встречаются головки с диффузором диаметром 750 мм). Но не все низкочастотные головки имеют диффузоры большого диаметра. Низкочастотные головки, помещаемые в закрытый ящик (см. ниже), должны иметь диффузор диаметром не более 200 мм, хотя к. п. д. при этом снижается. Чем меньше объем закрытого ящика, тем, естественно, должен быть меньше диаметр диффузора.

На верхних частотах поверхность диффузора разбивается на отдельные колеблющиеся участки, эффективная излучающая поверхность уменьшается, сопротивление излучения становится постоянной величиной $r_и \approx \rho c S_д$ и излучаемая мощность оказывается пропорциональной только первой степени эффективной площади поверхности диффузора. В связи с этим излучаемая мощность определяется отношением эффективной площади поверхности диффузора к квадрату инерциального сопротивления подвижной системы [1], т. е. $S_{д\ эф}/(2\pi f m)^2$.

Вследствие этого излучаемая мощность уменьшается при увеличении размеров диффузора и повышении частоты. Кроме того, увеличение диаметра диффузора может повысить направленность излучения и без того большую на этих частотах, что нежелательно. Поэтому высокочастотные головки имеют диффузоры диаметром до 100—120 мм и звуковые катушки малого размера.

---

[1] Излучаемая мощность на верхних частотах $P_{ак} = \omega^2 x^2 \rho c S_{д\ эф}$; подставив в эту формулу значение $x = F/\omega^2 m$, получим $P_а = F^2 \rho c S_{д.эф}/(\omega m)^2$.

Итак, с помощью одной широкополосной головки очень трудно обеспечить хорошее воспроизведение составляющих низших и высших частот.

Широкополосные головки. Широкополосная головка конструируется на основе компромисса между требованиями к низкочастотной и высокочастотной головкам. Наиболее простая конструкция широкополосной электродинамической головки с круглым диффузором и кольцевым магнитом из никель-алюминиевого сплава показана на рис. 3. Эта конструкция получила наибольшее распространение. Называть ее широкополосной можно с определенной степенью приближения, поскольку подобные головки имеют частотные характеристики, охватывающие полосу частот от 60—125 Гц до 8—12 кГц.

На рис. 23, *а* изображена широко используемая в радиолах, телевизорах и магнитофонах головка 2ГД-36 с эллиптическим диффузором и керновым магнитом из сплава ЮНДКА-24. Эта головка отличается удобной формой и малым магнитным полем рассеяния. Такие же головки могут иметь диффузоры с криволинейной образующей.

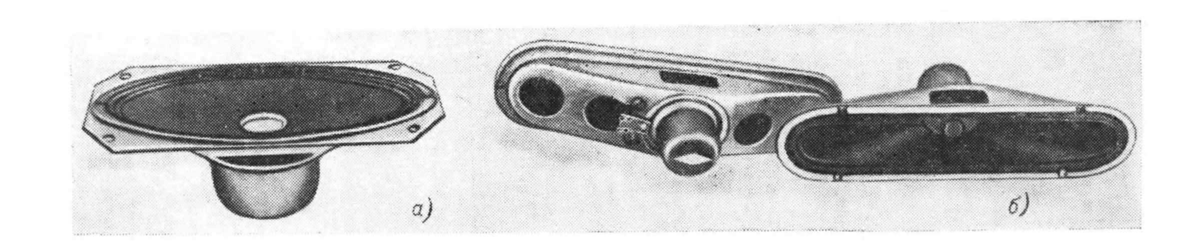
Головка 2ГД-22, которую можно считать «сверховальной» (рис. 23, *б*), позволяет еще более экономно использовать объем телевизора, магнитофона и другого устройства с ограниченными габаритами.

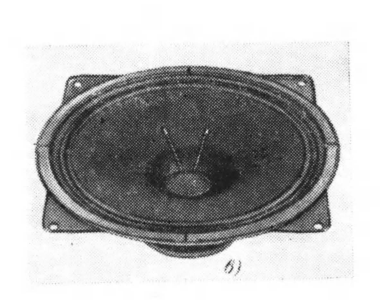
Головка 4ГД-35 (рис. 23, *в*) отличается от головки 2ГД-22 главным образом конфигурацией магнитной системы. Применение плоского кольцевого магнита из феррита бария позволило уменьшить высоту головки. Она выпускается с 1973 г. вместо головки 4ГД-28, развивавшей несколько меньшее среднее стандартное давление.

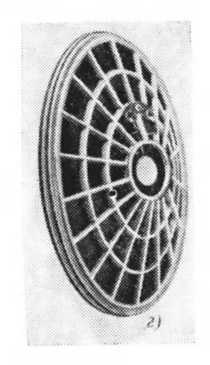
Упомянем о самой плоской конструкции головки, магнитная система которой помещена внутри диффузора. Эта головка более сложна в производстве, иногда в области частот выше 2 кГц обладает несколько менее ровной частотной характеристикой, чем головка с обычным расположением магнитной системы. Головка такой конструкции выпускается обычно как законченный громкоговоритель (рис. 23, *г*). Еще более плоскую головку имеет «подушечный» громкоговоритель PH-10 (рис. 24), выпускаемый Будапештским электроакустическим заводом. Этот громкоговоритель, выполненный в пластмассовом корпусе, имеет толщину 12 мм при диаметре 70 мм и согласно данным завода воспроизводит диапазон частот от 200 Гц до 12 кГц. Он не создает акустических помех для окружающих и предназначен для индивидуального пользования в общежитиях, больничных палатах и тому подобных условиях; его помещают под подушкой слушающего.

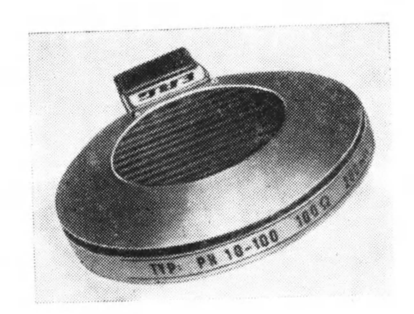
Для улучшения частотной характеристики широкополосной головки в области высших частот часто внутри основного диффузора помещают дополнительный диффузор малых диаметра и массы. Последний является основным излучателем колебаний высших частот, так как на этих частотах большой диффузор излучает плохо вследствие значительного уменьшения его эффективной поверхности. Образец двухдиффузорной головки показан на рис. 12; такими головками являются 4А-28, 4А-32 и др. На примере головки 4А-28 (рис. 25) показано влияние второго диффузора на частотную характеристику звукового давления.

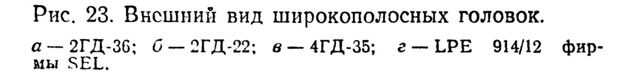
Эффективным средством улучшения воспроизведения звуков высших частот является двухполосная комбинированная головка. Она объединяет в одной коаксиальной конструкции две узкопoлос-










Рис. 23. Внешний вид широкополосных головок.

а — 2ГД-36; *б* — 2ГД-22; *в* — 4ГД-35; *г* — LPE 914/12 фирмы SEL.

Рис. 24. Подушечный громкоговоритель PH-10.

ные головки, каждая из которых воспроизводит часть широкого диапазона частот. Обе головки или только высокочастотную соединяют с выходом усилителя через фильтр, защищающий высокочастотную головку от перегрузки.

На рис. 26 представлена коаксиальная конструкция, в которой внутри большого диффузора, принадлежащего низкочастотной головке *2*, установлена на мостике малогабаритная высокочастотная головка *1*. Задняя сторона диффузора высокочастотной головки во избежание воздействия на нее излучения низкочастотной головки и появления искажений должна быть закрыта жестким замкнутым кожухом. Как и все двухполосные громкоговорители, коаксиальная головка обладает более ровной частотной характеристикой, обычно свойственной узкополосным головкам. Благодаря тому что диффузор высокочастотной головки имеет малую площадь, коаксиальные головки имеют расширенную характеристику направленности.

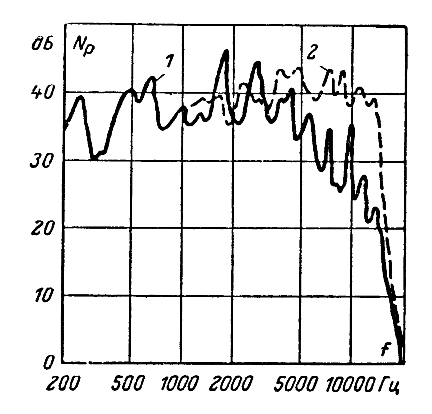


Рис. 25. Частотные характеристики головки 4А-28.

1 — без дополнительного диффузора; *2* — с дополнительным диффузором.

Еще более широкой характеристикой направленности обладает излучатель, составленный из двух высокочастотных головок, установленных под углом друг к другу и укрепленных на керне или диффузородержателе низкочастотной головки. Выпускают также двухполосные коаксиальные головки, у которых диффузорная высокочастотная головка заменена рупорной. В некоторых конструкциях применяют многоячеечный рупор с выходными отверстиями, расположенными по сферической поверхности. Этим обеспечивается еще более широкая характеристика направленности громкоговорителя на высших частотах. В других конструкциях коаксиальных громкоговорителей рупором высокочастотной головки *1* служит диффузор *2* низкочастотной головки с криволинейной образующей (рис. 27). В обеих рассмотренных конструкциях коаксиального громкоговорителя высокочастотная часть расположена за магнитной системой низкочастотной и рупор проходит через керн последнего либо в нем сделано конусное отверстие, используемое как часть рупора.

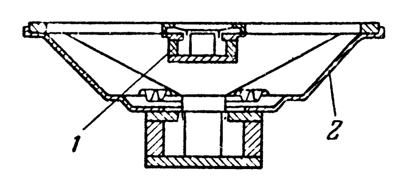


Рис. 26. Простейший коаксиальный громкоговоритель.

Наиболее сложной по конструкции и дорогой является трехполосная коаксиальная го-

ловка (рис. 28). Она состоит из низкочастотной головки с диффузором *2*, среднечастотной с рупором *3* и рупорной (или диффузорной) высокочастотной головки *1*, установленной внутри диффузора низкочастотной головки; над диафрагмами высокочастотной и среднечастотной головок помещены противоинтерференционные вкладыши *4* и *5* в виде усеченных конусов. Они ослабляют интерференционные явления, возникающие из-за различия путей звуковых волн, излучаемых различными точками диафрагмы, до входного отверстия рупора. Возникающие фазовые сдвиги ухудшают частотную характеристику на высших частотах.

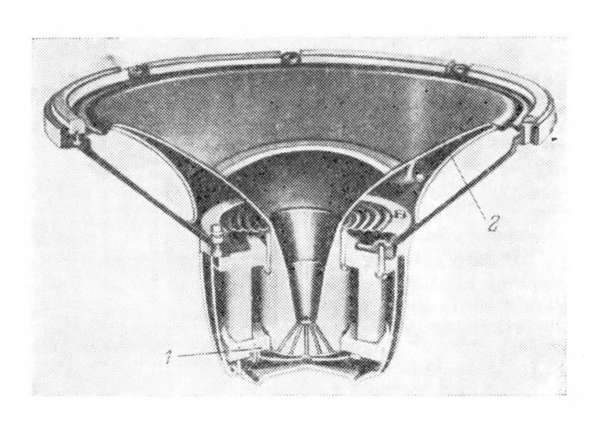


Рис. 27. Двухполосный коаксиальный громкоговоритель с рупором, образованным диффузором низкочастотной головки.

Вкладыши уравнивают длины путей от различных точек диафрагмы до входного отверстия и тем самым уменьшают фазовый сдвиг между мгновенными значениями звуковых давлений, создаваемых различными точками диафрагмы.

Противоинтерференционный вкладыш может иметь несколько сквозных отверстий, расположенных по его длине под небольшими углами к его оси, как это и сделано в головке, показанной на рис. 27.

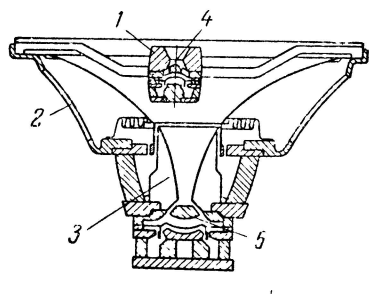


Рис. 28. Трехполосный коаксиальный громкоговоритель

Диффузородержатели коаксиальных головок во избежание перекосов должны быть особенно жесткими; обычно диффузородержатели делают литыми и усиливают ребрами жесткости. Все двух- и трехполосные коаксиальные головки включают через разделительные фильтры (см. ниже).

Среднечастотные головки. Поскольку среднечастотная головка должна воспроизводить полосу частот приблизительно

от 300 Гц до 5 кГц, в среднечастотном звене трехполосной акустической системы можно применить практически любую широкополосную головку необходимой мощности. При этом существенно, чтобы среднее стандартное звуковое давление среднечастотной головки приблизительно соответствовало этому параметру остальных головок, а диаметр диффузора был возможно меньшим. Последнее условие вызывается желанием обеспечить наименьшую направленность излучения в верхней части среднечастотного диапазона — на частотах 2—5 кГц Типичными среднечастотными головками являются головки 3ГД-1, 4ГД-43 и 4ГД-8Е с диффузорами диаметром 125 и 70 мм.

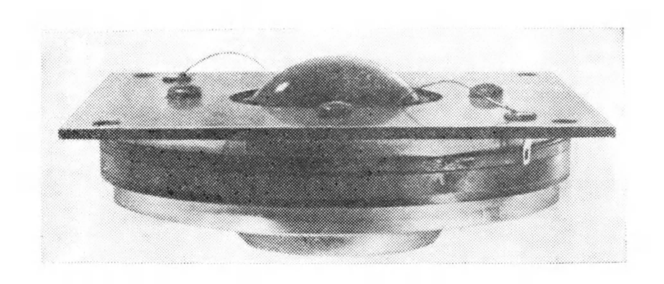


Рис. 29. Среднечастотная головка с полусферической диафрагмой фирмы Braun.

С целью уменьшения направленности излучения за рубежом выпускают среднечастотные головки с полусферической мембраной диаметром около 50 мм вместо диффузора На рис. 29 показана среднечастотная головка фирмы Braun (ФРГ) номинальной мощностью 20 Вт. Ее основная резонансная частота 300 Гц, номинальный диапазон частот 400 Гц — 5 кГц Отечественная кинопромышленность выпускает среднечастотные рупорные головки для двухполосных громкоговорителей.

Низкочастотные головки. В связи с тем, что низшая граница воспроизводимого громкоговорителем диапазона частот определяется не только его акустическим оформлением, но и основной резонансной частотой головки, низкочастотными головками считают головки с основной резонансной частотой ниже 60 Гц; к их числу относятся головки 6ГД-2, 8ГД-1 и 10ГД-30, основные резонансные частоты которых соответственно равны 30±5, 25±5 и 30±5 Гц. Головка 10ГД-30 (см. рис. 9) имеет утолщенный диффузор диаметром около 150 мм с резиновым подвесом вместо краевого гофра. Небольшой диаметр диффузора позволяет эффективно использовать эту головку в закрытом ящике. Для снижения частоты основного резонанса масса звуковой катушки головки и гибкость подвеса подвижной системы увеличены. В результате увеличения массы подвижной системы и малого диаметра диффузора среднее стандартное звуковое давление головки 10ГД-30 составляет только 0,15 Па. На рис 30 приведена частотная характеристика головки 10ГД-30 в закрытом ящике объемом 20 л.

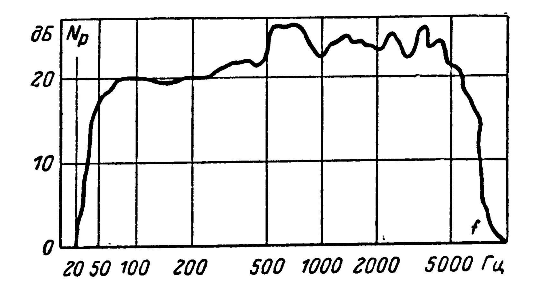


Рис. 30. Частотная характеристика головки 10ГД-30 в закрытом ящике объемом 20 л.

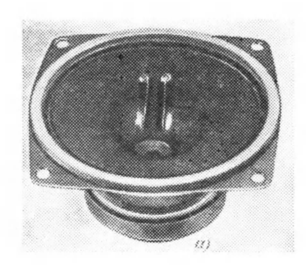
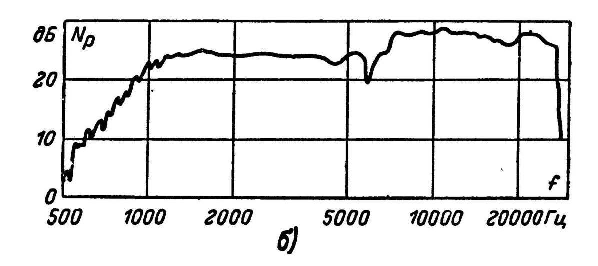


Рис. 31. Внешний вид (*а*) и частотная характеристика (*б*) высокочастотной головки 3ГД-31.



В отличие от низкочастотной головки, предназначенной для работы в закрытом ящике небольшого объема, выпускаемая отечественной кинопромышленностью низкочастотная головка 2А-12, работающая в фазоинверторе, имеет диффузор почти вдвое большего диаметра, чем головка 10ГД-30, и основную резонансную частоту 40±5 Гц; ее среднее стандартное звуковое давление 0,35 Па.

Отметим, что, несмотря на всю привлекательность малогабаритной низкочастотной головки, уменьшение диаметра ее диффузора ведет к уменьшению к. п. д. и увеличению амплитуды перемещений диффузора для получения неизменной акустической мощности. Уве-

личение перемещений подвижной системы, как уже указывалось выше, увеличивает нелинейные искажения.

Высокочастотные головки. Высокочастотные головки должны воспроизводить полосу частот от 2—3 до 15—20 кГц. Они имеют диффузор или полусферическую мембрану. Направленность излучения головки последнего типа меньше. За рубежом они получили значительное распространение. Кроме того, применяют высокочастотные рупорные электродинамические головки. К числу диффузорных головок относятся овальная головка 2ГД-36 и круглые головки 3ГД-2 и 3ГД-31. На рис. 31 приведены внешний вид и частотная характеристика широко распространенной головки 3ГД-31. К высоко-

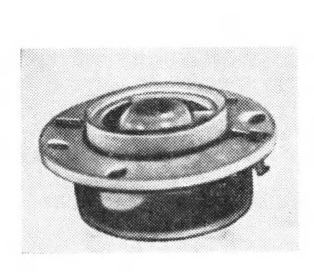


Рис. 32. Высокочастотная головка 1ГД-3РРЗ.

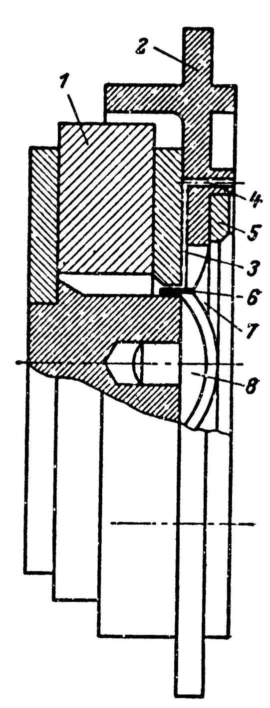


Рис. 33. Разрез головки фирмы SEL.

частотным диффузорным головкам относится также головка 1ГД-3РРЗ (рис. 32). Устройство подобной же головки с номинальной мощностью 70 Вт (фирма SEL, ФРГ) показано в разрезе на рис. 33. Здесь *1* — магнит из феррита бария; *2* — корпус головки, *3* — полость; *4* — демпфирующее отверстие; *5* — прижимное кольцо; *6* — звуковая катушка; *7* — мембрана; *8* — грибок из пластмассы. Высшая граничная частота головки с полусферической диафрагмой пропорциональна ее жесткости при минимальной массе. Японской фирме Yamaha удалось изготовить для высокочастотной головки модели NS-1000M полусферическую диафрагму диаметром 30 мм из

бериллия толщиной 30 мкм, жесткость которой в 2,5 раза больше, чем диафрагмы из титана, и в 6 раз больше, чем алюминиевой (плотность бериллия 1,8 г/см³).

Головки без диффузоров. В заключение раздела упомянем об электродинамических головках без диффузоров. Громкоговорителем такая головка становится, когда ее подвижную систему жестко прикрепляют к стене (панели) из дерева, металла, пластмассы, стекла либо к шкафу, столу и т. п., которые становятся излучателями звука. Одно из применений этих головок — озвучивание больших помещений с музыкальным или шумовым фоном. Такая головка превращает стену или панель в некоторое подобие распределенной системы громкоговорителей. Звучание панели свободно от направленности и приятно на слух.

Головка такого громкоговорителя представляет обычную магнитную систему, используемую в головках прямого излучения, но подвижная система имеет более прочную звуковую катушку. Последняя подвешена на жесткой центрирующей шайбе и имеет винт или площадку с отверстиями для прикрепления головки к панели.

ЗВУКОВЫЕ КОЛОНКИ И РАДИАЛЬНЫЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

За последнее десятилетие для звуковоспроизведения и звукоусиления стали широко использовать громкоговорители в виде звуковых колонок и радиальных громкоговорителей

Звуковая колонка представляет собой деревянный или металлический закрытый ящик прямоугольной или овальной формы, в котором установлены в один или два ряда от 4 до 12 включенных синфазно головок прямого излучения. Вертикально расположенная цепочка головок обладает малой направленностью излучения в горизонтальной плоскости, соответствующей одной головке, и значительно большей направленностью в вертикальной плоскости. Для еще большего расширения характеристики направленности в горизонтальной плоскости головки устанавливают в два ряда под углом 60° или в случае одного ряда в колонке развертывают на 30° по горизонтали оси смежных головок Чтобы устранить слишком большую направленность излучения в вертикальной плоскости частот выше 3 кГц, цепочки головок располагают по дуге радиусом, равным двойной высоте колонки. В этом случае характеристика направленности излучения на частоте 4 кГц охватывает даже более широкий угол, чем на частоте 1 кГц, в противоположность тому, что имеет место у прямых колонок.

В последнее время звуковыми колонками начали называть, хотя и неправильно, двухполосные малогабаритные акустические системы. На рис. 34 приведен внешний вид малогабаритной закрытой акустической двухполосной системы («колонки») 10МАС-1, выпускаемой Бердским радиозаводом. Она содержит низкочастотную головку 10ГД-30 и высокочастотную головку 3ГД-31, установленные в закрытом ящике объемом 20 л. Такими громкоговорителями комплектуют стереофонические электрофоны «Вега-101».

Бердский завод выпускает также набор «Акустика», состоящий из двух головок упомянутых типов, передней панели с отверстиями и крепежного материала.

Радиальный громкоговоритель. Его характеристика направленности представляет собой окружность. Первым выпущенным у нас радиальным громкоговорителем был двухполосный громкоговоритель ДГР-25. Этими громкоговорителями оборудована система звукоусиления на ВДНХ в Москве. Он состоит из низкочастотной головки, установленной аксиально в верхней части громкоговорителя и излучающей через короткий направляющий упор, и трех высокочастотных головок, установленных наклонно в нижней части громкоговорителя под углом 120° друг к другу в горизонтальной плоскости.

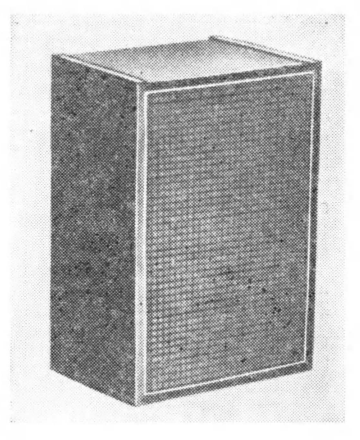


Рис. 34. Внешний вид акустической системы 10МАС-1.

Выпущенные позже радиальные громкоговорители 10ГДН-1 и 25ГДН-1 имеют одинаковую, более простую конструкцию: 4 широкополосные головки установлены внутри круглого металлического кожуха, симметрично по окружности под углом 35° к оси громкоговорителя. Для уменьшения направленности на высших частотах под кожухом с головками имеется отражатель (рассеиватель).

Отметим, что звуковая колонка может быть хорошим радиальным громкоговорителем, если она содержит 3—4 вертикальных ряда головок, развернутых по окружности так, что угол между их осями равен 120° для трех рядов головок и 90° для четырех.

РУПОРНЫЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Рупорные громкоговорители получили значительное распространение в мощных системах звукоусиления и оповещения при больших открытых пространствах (на площадях, улицах). Низкий к. п. д. громкоговорителей с головками прямого излучения привел бы в этих случаях к существенному увеличению затрат на установку и эксплуатацию усилителей, а то, что рупорные громкоговорители являются среднечастотными для воспроизведения речи, малосущественно. Благодаря применению рупора — трубы с непрерывно возрастающим сечением — улучшается согласование относительно высокого механического сопротивления подвижной системы головки с довольно низким сопротивлением нагрузки воздушной среды, характеризуемым сопротивлением излучения. Рупор увеличивает сопротивление излучения и значительно повышает к. п. д. громкоговорителя. Наибольшее распространение получил рупор, площадь поперечного сечения которого возрастает по экспоненциальному закону

$$S = S_0 e^{\beta x},$$

где S_0 — площадь поперечного сечения начала рупора (горла); β —

коэффициент расширения; x — координата, отсчитываемая вдоль оси рупора от его начала (горла) к устью.

Подобно электрическому фильтру верхних частот рупор характеризуется граничной частотой (частотой среза). Значение ее зависит от коэффициента расширения рупора Для эффективного воспроизведения низших звуковых частот рупор должен иметь значительные размеры, что является его главным недостатком. Поэтому в настоящее время рупорные громкоговорители применяют главным образом в качестве высокочастотных звеньев («пищалок») в двух- и трехполосных акустических агрегатах, так как в этих случаях размеры рупора и всего громкоговорителя могут быть небольшими.

В кинотеатральных и уличных громкоговорителях широко используют сложенный (свернутый) рупор (одна его часть помещается в другой) и укороченный широкогорлый рупор. Примером громкоговорителя со сложенным рупором является среднечастотный громкоговоритель 10ГРД-5 Устройство его электродинамической головки подобно устройству головки прямого излучения; основное ее отличие состоит в конструкции излучающего элемента, которым служит легкая дюралюминиевая диафрагма куполообразной (для повышения жесткости) формы диаметром 30—50 мм.

Значение среднего стандартного звукового давления, создаваемого рупорными громкоговорителями, составляет 1—2 Па, что в несколько раз больше, чем давление, создаваемое громкоговорителями с головками прямого излучения.

Как показали испытания, сложенный рупор хуже воспроизводит звуковые составляющие высших частот из-за потерь при отражениях звука на изгибах рупора. Поэтому в широкополосных громкоговорителях устройств высококачественного звуковоспроизведения сложенный рупор не применяют.

В громкоговорителе с направляющим широкогорлым рупором используют обычную головку прямого излучения небольшого диаметра (до 150 мм). К таким громкоговорителям относятся среднечастотные громкоговорители Р-10, 25ГРД-Ш2 и двухполосный громкоговоритель 30А-66 для кинотеатров. В последнем для улучшения воспроизведения низших частот, помимо короткого направляющего рупора, имеется фазоинвертор, два отверстия которого расположены рядом с рупором. Сверху низкочастотного громкоговорителя установлена высокочастотная головка с рупором.

Поскольку на высших частотах направленность излучения увеличивается, для расширения характеристик направленности в высокочастотных рупорных громкоговорителях с успехом применяют два средства. Первое, более старое средство состоит в секционировании рупора: он образуется примыкающими друг к другу рупорами меньшего сечения, оси которых расположены веером. Излучение секционированного рупора направлено в пределах более широкого угла, образуемого веером акустических осей. Поэтому угол раствора характеристик направленности такого громкоговорителя практически не зависит от частоты, так как он определяется пространственным расположением отдельных секций рупора. Это эквивалентно излучению группы отдельных головок, расположенных рядом на сферической поверхности так, что их оси, сходящиеся в центре сферы, образуют одинаковые острые углы одна с другой.

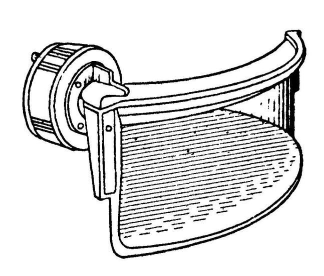
Такую конструкцию имеет предназначенный для акустических измерений громкоговоритель модели 4241 фирмы Brüel & Kjaer (Дания) с номинальным диапазоном частот 10 Гц — 3кГц и трехполос-

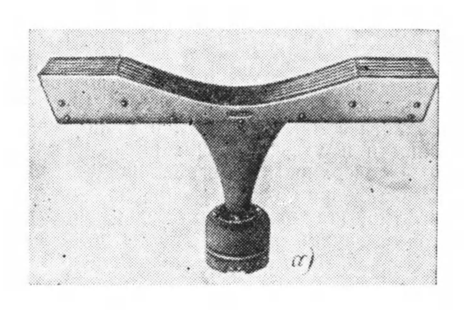
ный громкоговоритель фирмы Design Acoustics (США), представляющий собой фазоинвертор с резонансной частотой 27 Гц, выполненный в виде двенадцатигранника объемом 70 л (рис. 35).

Другим эффективным средством ослабления направленности рупорного громкоговорителя является акустическая линза (рис. 36, *а*). Она проще в изготовлении, чем секционированный многоячеечный рупор. Принцип действия акустической линзы подобен действию оптической рассеивающей линзы, преобразующей распространяющуюся вдоль оси плоскую волну в сферическую или цилиндрическую. Однако между ними есть различие. Оптическая линза преобразует плоскую волну, изменяя ее фазовую скорость тем более, чем длиннее ее путь в линзе; изменение скорости распространения волны обусловлено тем, что скорость распространения света в стекле меньше, чем в воздухе. В акустической же линзе ско-

Рис. 35. Ненаправленные громкоговорители.

а — измерительный фирмы Brüel & Kjaer; *б* — фирмы Design Acoustics.





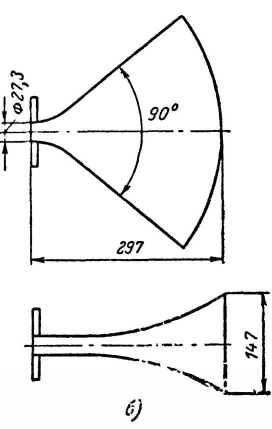


Рис. 36. Акустическая линза (*а*) и рупор с цилиндрическим фронтом волны (*б*).

рость распространения звука везде одинакова, а преобразование формы волны происходит вследствие различия длины путей волн, проходящих через линзу в центре и на периферии. Путь звуковой волны в акустической линзе удлиняется наклонными каналами или щелями.

В зависимости от осевой симметрии линзы и ее положения в пространстве характеристику направленности рупорного громкоговорителя можно расширить как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях или только в одной из них.

Дальнейшим усовершенствованием средств, уменьшающих направленность излучения высших частот рупорных громкоговорителей, явилась замена рупора с рассеивающей линзой рупором цилиндрического фронта волны (рис. 36, *б*). В нем по экспоненциальному закону увеличиваются площади цилиндрических поверхностей, перпендикулярных оси рупора. Поэтому выходное отверстие (устье) рупора имеет форму цилиндрической поверхности. Рупор цилиндрического фронта волны обеспечивает несколько меньшую направленность, чем линза. Рупор отливают из алюминиевого сплава.

ВЛИЯНИЕ ПОМЕЩЕНИЯ И ВЫБОР НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Акустические свойства помещения зависят от его формы, объема, коэффициентов звукопоглощения, потолка, пола, стен, а также от заполнения помещения. Так, например, шторы, ковры, мягкая мебель и т. п. обладают большими коэффициентами звукопоглощения, тогда как потолок и стены мало поглощают звук и в значительной степени его отражают. Идеальным звукопоглотителем является открытое окно. Звукопоглощение A пропорционально площади поглотителя S и его коэффициенту звукопоглощения α.

Всякое помещение (зал, аудитория, жилая комната) представляет собой акустическую резонансную систему с распределенными параметрами, обладающую рядом собственных резонансных частот. При возбуждении в помещении звуков, содержащих составляющие резонансных частот, внутри помещения возникают резонансные колебания воздуха. Это приводит к усилению звука на резонансных частотах и изменению спектрального состава звукового сигнала, т. е. к изменению его тембра.

Отражения волн от стен помещения является причиной возникновения стоячих волн Они сильно нарушают однородность звукового поля; в нем появляются области с максимальным и минимальным звуковым давлением — пучности и узлы. Стоячие волны образуются как между параллельными поверхностями, ограничивающими помещение, так и при косых направлениях распространения звуковых волн. Однако волны первого типа (так называемые осевые моды) имеют наибольшее значение в формировании звукового поля в помещении, особенно малых размеров. Первая (осевая) частота собственных колебаний, возникающих между параллельными поверхностями, равна $f_{p1} = 172/l$, где l — расстояние между ограничивающими поверхностями, м. Таким образом, самая низкая частота собственных колебаний определяется наибольшим размером помещения, обычно его длиной. Например, при наибольшем расстоянии между стенами около 3,4 м собственная частота равна 50 Гц. Самым неудачным для

прослушивания является помещение, имеющее форму куба, так как у него во всех трех направлениях будет одинаковой и основная резонансная частота и ее гармоники.

Итак, в любом помещении существует множество собственных колебаний. При этом в области, начинающейся с самой низшей собственной частоты, плотность спектра собственных колебаний сравнительно невелика, но с повышением частоты резко увеличивается. Поэтому для не очень малых помещений, начиная уже с частоты 150—200 Гц, плотность спектра собственных колебаний настолько велика, что явление резонанса малозаметно. Большое помещение более благоприятно для звуковоспроизведения, так как основные резонансные частоты с увеличением его размеров понижаются и оказываются за пределами нижней границы рабочего диапазона частот, а гармоники благодаря большому их числу образуют почти сплошной спектр и не подчеркивают звуки отдельных частот. Желательно, чтобы объем помещения был не менее 42 $м^3$, а один из его линейных размеров не менее 5 м.

Эффективным средством, улучшающим прослушивание, является наличие в помещении поглотителей звука, уменьшающих время реверберации. В театрах, кино, концертных залах применяют звукопоглотители, которыми покрывают потолок и верхние части стен.

В жилых помещениях звук поглощается мягкими вещами, включая и мебель. Конечно, и сами слушатели оказываются в роли звукопоглотителей и от их числа зависит степень поглощения в помещении. Укажем, что коэффициент звукопоглощения одного слушателя $\alpha=0{,}38$, ковра — 0,35, занавеси (присборенной) — 0,5. К сожалению, звуки низших частот поглощаются большинством звукопоглотителей в меньшей степени, чем звуки средних и особенно высоких частот. Удовлетворительно заглушить помещение на низших частотах довольно сложно.

Для домашнего монофонического прослушивания считается удовлетворительной комната с временем реверберации 0,6—0,9 с (для стереофонического 0,4—0,5 с); чем больше объем комнаты $V_п$, тем большим может быть время реверберации при сохранении хороших условий звуковоспроизведения. На рис. 37 представлена зависимость оптимального времени реверберации помещения T от его объема $V_п$. Для наглядного представления зависимости звукового давления, создаваемого громкоговорителем в помещении (в точке расположения измерительного микрофона), на рис. 38 приведены частотные характеристики высококачественного громкоговорителя, измеренные в комнате и звукомерной (заглушенной) камере. Как видно, на частотах ниже 400 Гц характеристика в обычной комнате весьма неравномерна (пунктирная кривая), тогда как в звукомерной камере, где все ограждающие поверхности обладают большим коэффициентом звукопоглощения, частотная характеристика сглаживается (сплошная кривая). Форма частотной характеристики, снятой в комнате, сильно зависит от взаимного расположения микрофона и громкоговорителя.

Уровень звукового давления, развиваемого громкоговорителем на низших частотах, возрастает приблизительно на 4 дБ при установке его в углу комнаты. Однако при небольших размерах комнаты «окраска» звучания становится неприятной (возникает «бубнение») и увеличивается неравномерность частотной характеристики в области низших частот. Оптимальное положение громкоговорителя находят после нескольких проб.

Хорошим местом для размещения громкоговорителя (двух при стереофонии) в прямоугольной комнате будет короткая стена. Громкоговорители устанавливают на более короткой стене, отступя от угла на 0,5—1 м. Полезно, чтобы на стене, противоположной громкоговорителям, находилось звукопоглощающее покрытие (ковер, драпировки т. п.).

В последнее время за рубежом стали выпускать «уравнители» (Equalizer) — устройства, уменьшающие влияние неблагоприятной

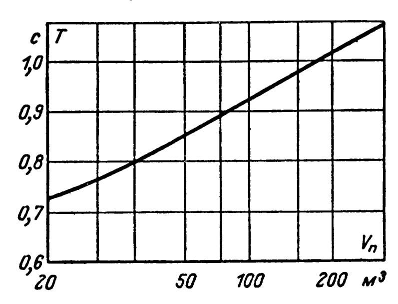


Рис. 37. Зависимость оптимального времени реверберации помещения от его объема.

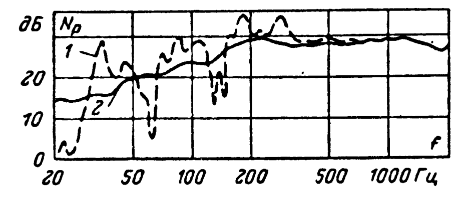


Рис. 38. Частотные характеристики громкоговорителя.
1 — в обычной жилой комнате; 2 — в звукомерной камере.

акустики помещения путем коррекции частотной характеристики канала звуковоспроизведения. Уравнитель включают между усилителем и источником звукового сигнала (магнитофон, электрофон, радиоприемник); он представляет собой набор фильтров, центральные частоты которых $f_ц$ расположены через одну октаву или 1/3 октавы в диапазоне частот от 40 Гц до 20 кГц. Однооктавный уравнитель содержит 11, а третьоктавный — 25—27 фильтров. Относительная ширина полосы фильтров $\Delta f/f_ц = (f_{макс} - f_{мин})/f_ц$ составляет приблизительно 25%, а глубина регулировки ±16 дБ.

Фильтры однооктавного уравнителя типа Mark VII фирмы SAE (США) имеют центральные частоты: 40; 78; 160; 330; 615; 1260; 2500; 4800; 9600; 15 000 и 20 000 Гц, а центральные частоты фильтров третьоктавного уравнителя соответствуют стандартным значениям: 40; 50, 63; 80; 100 Гц и т. д. Представление о схеме уравнителя дает статья в журнале «Радио», 1974 г., № 5. Эффективность действия третьеоктавного уравнителя иллюстрирует рис. 39. Частот-

ные характеристики громкоговорителя в комнате по уровню звукового давления измерены с помощью генератора розового шума, причем для большей наглядности частотная характеристика устройства при включенном уравнителе на рисунке смещена вниз.

Широкому применению уравнителей препятствуют два серьезных обстоятельства. Первое — необходимость иметь значительный запас выходной мощности усилителя в области низших частот и способность громкоговорителя преобразовать эту мощность в звуковую.

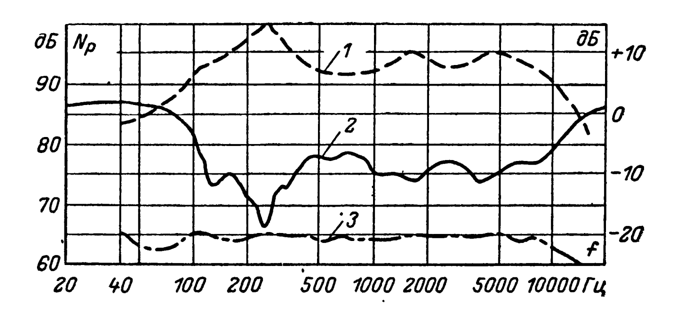


Рис. 39. Пример выравнивания частотной характеристики звукового давления третьоктавным уравнителем.

1 — частотная характеристика уровня звукового давления, создаваемого громкоговорителем в жилой комнате; *2* — частотная характеристика уровня выходного напряжения уравнителя; *3* — частотная характеристика уровня звукового давления, создаваемого громкоговорителем при включенном уравнителе.

Чтобы лучше представить себе возникающие при этом трудности, обратимся к рис. 39. Для того чтобы в этом примере выравнивания частотной характеристики уровень звукового давления тона частотой 40 Гц поднять до уровня тона частотой 1 кГц, нужно увеличить выходную мощность в 8 раз (на 9 дБ), а чтобы уравнять сигналы с частотами 40 и 250 Гц, необходимо увеличить мощность в 40 раз (на 16 дБ).

Другим препятствием применению уравнителя является необходимость предварительного измерения исходной частотной характеристики громкоговорителя в данном помещении. Это трудно осуществимо, так как для такого измерения необходим дорогой и не очень распространенный акустический измерительный прибор — шумомер с третьоктавными фильтрами или еще более дорогой третьоктавный анализатор в реальном масштабе времени. Поэтому многие зарубежные фирмы стали комплектовать звуковоспроизводящие устройства упрощенными активными уравнителями, включаемыми перед мощными усилителями. При разработке таких уравнителей учтены частотные характеристики жилых комнат, имеющих недостаточный объем для хорошего воспроизведения: они имеют пик в области частот 80—200 Гц, а на частотах ниже 60 Гц уровень звукового давления снижается. Упрощенный уравнитель дает возможность тремя ступенями уменьшить на 9 дБ уровень в области частот 80—150 Гц, поднять на 8 дБ уровень на частоте 30 Гц и снизить уровень на частоте 20 кГц.

Выбор громкоговорителя начинают с определения его номинальной мощности, значение которой совместно с к. п. д. укажет необходимую мощность выходного усилителя низкой частоты. Номинальная мощность громкоговорителя должна быть такой, чтобы обеспечить воспроизведение пиковых уровней без заметного увеличения искажений. Пиковые уровни на 6—10 дБ превышают среднеквадратичные (эффективные) значения уровня сигнала. Однако значительное повышение номинальных мощностей усилителя и громкоговорителей ведет к удорожанию и увеличению стоимости эксплуатации звуковоспроизводящего устройства. Чем больше объем помещения, в котором оно должно работать, и чем больший уровень громкости желают иметь, тем больше должны быть номинальные мощности. Выходная мощность усилителя зависит также от среднего коэффициента звукопоглощения помещения и к. п. д. громкоговорителей (или развиваемого ими среднего стандартного звукового давления). Напомним, что увеличение вдвое создаваемого громкоговорителем среднего стандартного давления соответствует снижению мощности усилителя в 4 раза.

В приводимом ниже расчете необходимой мощности принимается оптимальное время реверберации, при котором получается наилучшее звучание.

Если предположить равномерное распределение плотности звуковой энергии по помещению, то полная акустическая мощность источника звука в ваттах выразится формулой

$$P_a = 10^{-5}\frac{p^2 A}{4\rho c},$$

где p — эффективное значение звукового давления, Па; A — полное звукопоглощение в помещении, выражаемое площадью идеального поглотителя звука (открытое окно), м^2; ρ — плотность воздуха, равная 1,2 кг/м^3, c — скорость звука в воздухе.

Полное звукопоглощение помещения A связано с его объемом $V_п$ и временем реверберации T соотношением

$$A = 0,164 V_п / T.$$

Подставив в формулу для акустической мощности известные данные в выражение для A, получим:

$$P_a = p^2 V_п 10^{-6} / T.$$

Чтобы определить требуемую номинальную мощность громкоговорителя и усилителя, введем в эту формулу к. п. д. громкоговорителя η; тогда окончательная формула для определения номинальной выходной мощности усилителя и громкоговорителей будет иметь вид:

$$P_a = \frac{p^2 V_п}{T\eta} 10^{-6}.$$

Номинальную выходную мощность усилителя и суммарную номинальную мощность головок громкоговорителей P_a, необходимые для озвучивания помещений объемом $V_п = 20 \div 300$ м^3, можно найти, используя номограмму, приведенную на рис. 40. Нижняя пара наклонных линий на номограмме относится к звуковым уровням,

соответствующим звучанию оркестра в составе 18 исполнителей (эффективное значение звукового давления 0,4 Па, уровень 86 дБ), а верхняя пара — к звуковым уровням, соответствующим звучанию большого оркестра в составе 75 исполнителей (эффективное звуковое давление 1,25 Па — уровень 96 дБ). Значения номинальных мощностей надо выбирать с запасом: за минимально необходимую электрическую мощность принимают мощность, обеспечивающую удвоенное значение звукового давления при пиках звучания (уровни интенсивности звука 86+6=92 дБ для малого оркестра и 96+6=102 дБ для большого оркестра), а за максимальную электрическую мощность принимают мощность, обеспечивающую утроенное значение звукового давления при пиках звучания (уровни интенсивности звука соответственно 95,5 или 105,5 дБ в зависимости от числа исполнителей в оркестре). Очевидно, что увеличение звукового давления в 2 и 3 раза вызывает необходимость в увеличении номинальных электрических мощностей соответственно в $2^2=4$ и $3^2=9$ раз.

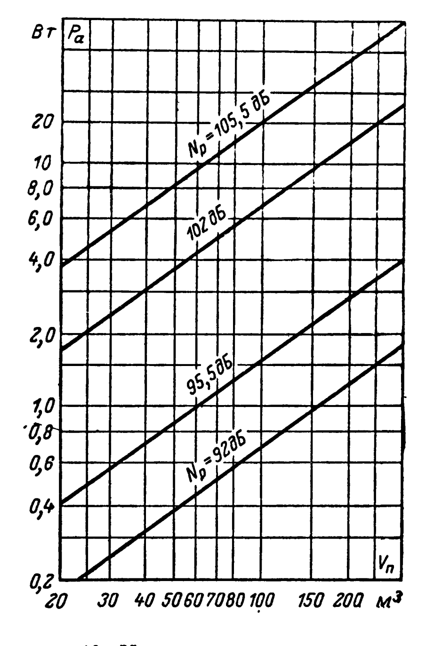


Рис. 40. Номограмма для расчета номинальной мощности громкоговорителя и выходной мощности усилителя в зависимости от объема помещения и уровня интенсивности звука.

В зависимости от объема помещения и желаемого уровня воспроизводимого звука, соответствующего оркестру из 18 или 75 исполнителей, требуемую номинальную мощность громкоговорителя следует выбрать между значениями, ограниченными двумя наклонными прямыми, относящимися к уровням интенсивности звука, соответствующим большему или меньшему оркестру.

Оптимальное время реверберации для помещений различных объемов определяют с помощью рис 37. Коэффициент полезного действия громкоговорителя принимают равным 1% ($\eta=0,01$). Такой к. п. д. имеет большинство громкоговорителей, хотя к. п. д. некоторых из них даже несколько меньше. Использование в звуковоспроизводящей установке лучших громкоговорителей приведет к образованию некоторого запаса по мощности.

Если время реверберации помещения меньше оптимального, уровень интенсивности звука также будет несколько меньше. Влияние увеличения звукопоглощения в комнате и соответствующего умень-

шения времени реверберации можно оценить, открыв во время работы громкоговорителей окна (если площадь их не менее 2—3 м^3).

Пример. Для звуковоспроизведения в комнате объемом 51 м^3 (площадь 17 м^2, высота 3 м) при уровне интенсивности звука, соответствующем большому оркестру, требуется громкоговоритель и усилитель с номинальными мощностями от 3,7 до 8,3 Вт или, округляя, от 4 до 10 Вт.

Полученное расчетом значение мощности относится к широкополосной головке. Мощность низко- и высокочастотной головок двух- или трехполосной системы при различных частотах раздела $f_{рзд}$ можно определить по кривым на рис. 41, построенным по ука-

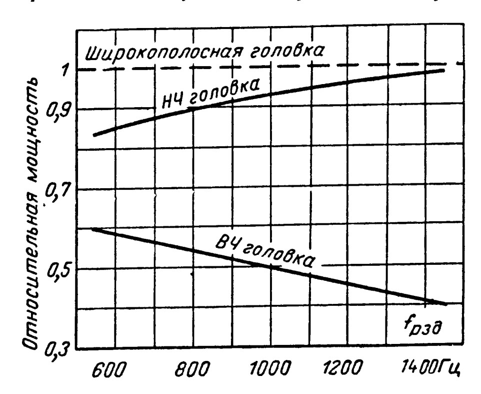


Рис. 41. Зависимость относительных номинальных мощностей низкочастотной и высокочастотной головок от частоты раздела.

занным выше данным распределения текущей мощности натуральных звучаний на выходе фильтров нижних и верхних частот. Мощность узкополосных головок определяется умножением расчетного значения мощности широкополосного громкоговорителя на значение относительной мощности для выбранной частоты раздела. При выборе уровней звучания необходимо иметь в виду, что очень высокие уровни отрицательно действуют на слух. Исследование, проведенное в Англии, показало, что среднее снижение слуха на различных частотах у 102 человек, регулярно посещавших концерты джазовой музыки, по сравнению с 53 человеками, не посещавшими такие концерты, составило:

Частота, Гц . .	1000	2000	3000	4000	6000
Снижение слуха, дБ	1,2	3,3	3,1	2,0	2,1

При этом средние звуковые уровни 11 музыкальных ансамблей, измеренные в центре комнаты в однооктавных полосах и отнесенные к центральным (средним) частотам этих полос, были равны:

Частота, Гц . .	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровень звука, дБ	92	102	108	104	104	104	94	78

Кроме того, следует помнить, что уровень звуковоспроизведения, хороший для вас, при существующей звукоизоляции квартир всегда будет слишком большим для ваших соседей.

АКУСТИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Диффузор головки совершает колебания; двигаясь вперед, он сжимает воздух перед собой и разрежает позади себя. В результате в воздухе создаются звуковые волны, распространяющиеся со скоростью приблизительно 340 м/с. При этом звуковые волны от передней и задней сторон диффузора (вследствие того что одна создает сжатие, а другая — разрежение воздуха) различаются по фазе на 180°, что соответствует половине длины излучаемой волны.

Если в точку пространства, где прослушивают звук, придут прямая и обратная (от задней стороны диффузора) волны, то, взаимодействуя одна с другой, они почти полностью взаимно уничтожатся, и звук будет резко ослаблен. При этом вместо того, чтобы возбуждать звуковые волны в окружающем пространстве, диффузор будет «перегонять» воздух с одной своей стороны на другую. Этот эффект (не совсем точно) называют акустическим коротким замыканием. Он проявляется только в области самых низких звуковых частот, примерно ниже 300 Гц, при которых размеры диффузора малы по сравнению с длинами этих волн.

Если, например, громкоговоритель воспроизводит звук с частотой $f=500$ Гц, то длина звуковой волны $\lambda=c/f=340/500=0{,}68$ м. Когда полный диаметр головки равен 320 мм$=0{,}32$ м, то до точки прослушивания, находящейся на акустической оси громкоговорителя, волна от задней стороны диффузора должна будет пройти путь, приблизительно на 0,26 м больший, чем волна от передней его стороны. Поэтому волна от задней стороны диффузора придет в точку приема с дополнительным фазовым сдвигом, значение которого определяется отношением разности длины путей от передней и задней сторон диффузора к длине волны. В нашем примере разность длины путей составляет 0,26 м, длина звуковой волны $\lambda=0{,}68$ м, следовательно, дополнительный фазовый сдвиг $\varphi_{доп}=0{,}26/0{,}68\approx0{,}4\ \lambda$.

Поскольку фаза звуковой волны, излучаемой задней стороной диффузора, сдвинута на 0,5 λ, результирующий фазовый сдвиг этой волны по отношению к волне от передней стороны диффузора $\varphi_{общ}=0{,}4\ \lambda+0{,}5\ \lambda=0{,}9\ \lambda$. Это означает, что волны от обеих сторон диффузора придут в точку приема почти в одинаковой фазе (фазовый сдвиг будет равен 0,1 λ), в результате чего звуковое давление возрастет. Для звука частотой 50 Гц ($\lambda=6{,}8$ м) при том же диаметре диффузора фазовый сдвиг вследствие огибания диффузора будет $\varphi_{доп}=0{,}26/6{,}8\approx0{,}04\ \lambda$ и $\varphi_{общ}=0{,}04\ \lambda+0{,}5\ \lambda=0{,}54\ \lambda$.

При таком фазовом сдвиге звуковые давления, создаваемые волнами от обеих сторон диффузора, будут вычитаться одно из другого и результирующее давление резко упадет.

Из разобранного примера следует, что если общий фазовый сдвиг волн от задней и передней сторон диффузора в точке приема звука равен целому числу длин волн (λ; 2 λ; 3 λ и т. д.), или близок к этим значениям, звук будет усиливаться. Если же фазовый сдвиг равен нечетному числу полуволн (0,5 λ; 1,5 λ; 2,5 λ и т. д.), от звук будет ослабляться.

Вычитание и сложение звуковых волн различных частот в точке их приема создают области максимумов и минимумов звукового давления. Подобное же взаимодействие (интерференция) может также происходить в результате отражения волн от каких-либо поверхностей. Именно поэтому частотные характеристики громкоговорителей измеряют обычно в открытом пространстве или в заглушенных помещениях, внутренние поверхности которых плохо отражают звуковые волны.

Если возникает интерференция между звуковыми волнами от передней и задней сторон диффузора, то наибольшая неравномерность частотной характеристики звукового давления будет наблюдаться вдоль акустической оси громкоговорителя при наличии его осевой симметрии. Это происходит потому, что фазовый сдвиг звуковых волн за счет огибания имеет примерно одинаковое значение вокруг всего громкоговорителя.

В стороне от акустической оси громкоговорителя из-за различия длин путей волн от различных частей диффузора до точки приема звука фазовый сдвиг обратной волны оказывается различным. В результате этого подъемы и провалы на частотной характеристике развиваемого громкоговорителем звукового давления сглаживаются.

Чтобы устранить интерференцию волн низших частот, излучаемых передней и задней сторонами диффузора, применяют различные виды внешнего оформления громкоговорителей: щит (акустический экран), открытый или закрытый ящик, фазоинвертор, акустический лабиринт, направляющий рупор.

Необходимо отметить, что акустическое оформление важно только для громкоговорителя, способного воспроизводить низшие частоты, т. е. с низкой частотой основного резонанса. Для громкоговорителей, предназначенных для карманных радиоприемников, основная резонансная частота которых высока, акустическое оформление неэффективно.

Акустический экран. Наиболее простым видом внешнего оформления громкоговорителя является акустический экран, представляющий собой чаще всего деревянный щит прямоугольной формы; размеры его должны быть довольно большими. Например, для воспроизведения без ослабления звука частотой 50 Гц, длина волны которого $\lambda = 680$ см, необходимо, чтобы сторона экрана была не менее $0{,}5\ \lambda = 340$ см. Однако, если частотная характеристика усилителя имеет подъем на низших частотах, удовлетворительные результаты можно получить со щитом меньшего размера, сторона которого приблизительно равна четверти длины волны низшей воспроизводимой частоты. Вместе с тем эта частота не может быть ниже основной резонансной частоты головки громкоговорителя, так как ниже этой частоты резко уменьшается излучение громкоговорителя (18 дБ на октаву).

Симметричность экрана относительно оси диффузора нежелательна, так как при этом в частотной характеристике громкоговорителя появится глубокий провал в результате акустического короткого замыкания на одной из частот. Значительного улучшения частотной характеристики достигают применением несимметричного экрана или асимметричным расположением головки в экране правильной формы.

На рис. 42 показаны размеры стандартного акустического экрана (ГОСТ 16122-70) для измерения параметров головок громкоговорителей и два способа их установки в экране. В настоящее время

этот простейший вид оформления громкоговорителей почти не применяют, главным образом из-за его громоздкости и недостаточной эстетичности.

Установка щита с головкой в углу комнаты (рис. 43) позволяет уменьшить его размеры без ухудшения воспроизведения звуков низших частот, так как образующие угол стены служат продолжением

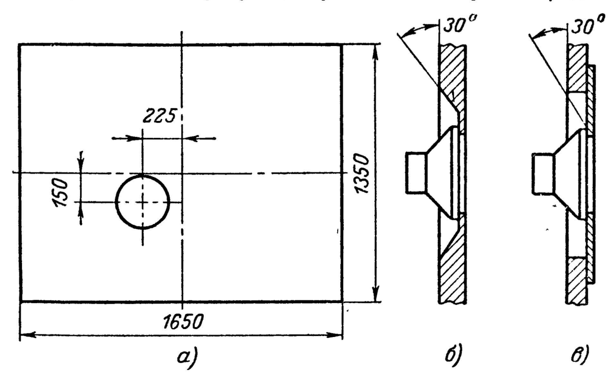


Рис. 42. Стандартный акустический экран для измерений головок громкоговорителей прямого излучения по ГОСТ 16122-70 (*а*) и способы их крепления (*б*, *в*).

экрана, увеличивая его эффективные размеры. Щит подвешивают у потолка, придав ему форму треугольника или трапеции. Между верхней кромкой щита и потолком необходимо оставить широкую щель, а пространство позади щита рекомендуется заполнить звукопоглощающим материалом. Головку полезно обернуть одним-двумя слоями неплотной ткани, например марли, предохраняющей подвижную систему от пыли.

Весьма эффективным экраном может служить дверь в соседнюю комнату, перегородка (стена) между комнатами, потолок, задняя сторона письменного стола, шкафа и т. п.

Щит может быть небольшим (размеры сторон 400—500 мм), если громкоговоритель должен воспроизводить только частоты выше 150—200 Гц. Такое положение часто имеет место в стереофоническом звуковоспроизведении, когда звуки низших частот могут воспроизводить общим громкоговорителем для обоих каналов (см. стр. 126), а звуки средних и высших частот разделенными гром-

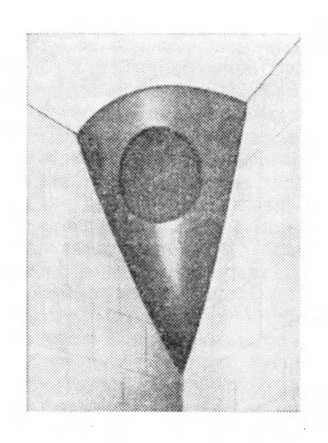


Рис. 43. Щит с громкоговорителем, подвешенный в углу комнаты.

коговорителями для каждого стереоканала. В этом случае на двух щитах устанавливают среднечастотные и высокочастотные головки правого и левого стереоканалов. Задние стороны их диффузоров во избежание нежелательного излучения звука закрывают кожухом, заполненным звукопоглотителем (см. ниже). Щиты обтягивают с обеих сторон неплотной декоративной тканью и каждый щит устанавливают в наклонном положении на полу с помощью одной подпорки (подобно рамкам для настольных фотографий и зеркал).

Ящик с отверстиями в задней стенке (с открытой задней стенкой) более удобен для размещения головки, чем плоский акустический экран. Такой ящик эквивалентен плоскому экрану, площадь которого приблизительно равна общей площади всех поверхностей ящика, кроме задней стенки, если глубина ящика не превышает $^1/_8$ наибольшей длины волны. Ящик с открытой задней стенкой представляет собой своеобразный резонатор Гельмгольца, резонансная частота которого в герцах

$$f_я = 172\sqrt[4]{S}\,/\sqrt{V_я}\,,$$

где S — площадь заднего отверстия ящика, см^2; $V_я$ — объем ящика, л.

Эксперименты с различными ящиками и головками, выполненные во Всесоюзном научно-исследовательском институте радиовещательного приема и акустики имени А. С. Попова, показали, что наилучшее воспроизведение низших частот получается, если резонансная частота ящика в 1,5—2 раза больше частоты основного резонанса головки. Если же эти частоты отличаются в значительно большее число раз, то ухудшается частотная характеристика громкоговорителя в области низших частот и звук становится бубнящим. В связи с этим рекомендуется определять по приведенной формуле резонансную частоту ящика с открытой задней стенкой. В упомянутом институте были измерены частотные характеристики, показывающие влияние глубины ящика на частотную характеристику громкоговорителя с головкой 2ГД-33 (рис. 44).

Ящики с открытой задней стенкой имеют очень широкое распространение Они являются конструктивной основой всех приемников, телевизоров, радиол, абонентских громкоговорителей и т. п.

Вынесенные громкоговорители используют в наших лучших радиолах «Виктория», «Симфония» и др. За границей в подавляющем большинстве случаев также выполняют радиоприемники без усилителя НЧ и громкоговорителя (так называемые Tuner — «настроечник»), а мощные усилители НЧ и громкоговорители являются конструктивно отдельными блоками.

Закрытый ящик (закрытая акустическая система) в настоящее время является самым распространенным и одним из наиболее перспективных видов акустического оформления громкоговорителей. Наличие задней стенки на первый взгляд должно улучшить воспроизведение низших частот, так как исключается излучение задней стороны диффузора (поэтому за рубежом этот вид оформления часто называют «бесконечным экраном») Однако упругость находящегося в ящике объема воздуха, особенно когда он меньше 200 л, складывается с упругостью подвижной системы головки и повышает ее основную резонансную частоту, т. е сужает рабочую полосу громкоговорителя со стороны низших частот.

Основная резонансная частота головки, помещенной в закрытый ящик, повысится и будет равна:

$$f'_{р} = f_{р} \sqrt{\frac{c_{я} + c_{г}}{c_{я}}},$$

где $c_{г}$ и $c_{я}$ — гибкости подвеса подвижной системы головки и объема воздуха в ящике.

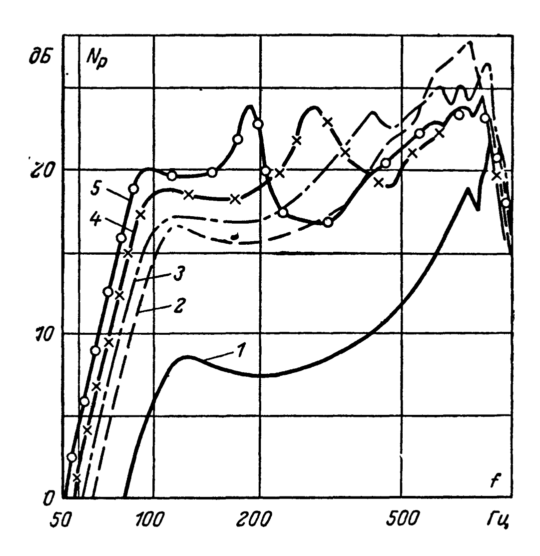


Рис. 44. Частотные характеристики головки 2ГД-33 в различных акустических оформлениях.

1 — головка без ящика; 2 — головка установлена на щите площадью 900 см²; 3 — головка в ящике глубиной 100 мм без задней стенки; 4 — то же глубиной 200 мм; 5 — то же глубиной 400 мм.

Гибкость объема воздуха в ящике, имеющая размерность м/Н, равна:

$$c_{я} = \frac{V_{я}}{\rho c^2 S^2_{д.эф}},$$

где ρ — плотность воздуха при температуре 20°С и нормальном атмосферном давлении, равная 1,2 кг/м³; c — скорость звука в воздухе; $S_{д.эф}$ — эффективная излучающая площадь диффузора, м².

Эффективной площадью диффузора считают 50—58% его действительной площади. Для круглого диффузора диаметром $D_{д}$

$$S_{д.эф} = 0{,}54 \pi D^2_{д}/4 = 0{,}42\ D^2_{д};$$

эффективная площадь эллиптического диффузора

$$S_{д.эф} = 0,42 D_б D_м,$$

где $D_б$ и $D_м$ — размеры большой и малой осей эллипса.

Если объем ящика $V_я$ выразить в литрах, а эффективный диаметр диффузора $D_{д\ эф}$ в сантиметрах, то гибкость воздуха в ящике можно определить по формуле

$$c_я = 1,14 V_я / D^4_{д.эф}.$$

Основную резонансную частоту головки в закрытом ящике можно выразить через массу ее подвижной системы $m_г$ (в килограммах)

$$f'_р = \sqrt{f^2_р + \frac{\rho c^2 S^2_{д.эф}}{30 m_г V_я}},$$

где $f'_р$ — новая частота основного резонанса, Гц; $f_р$ — частота основного резонанса головки без ящика, Гц; $V_я$ — объем ящика, м^3; остальные обозначения указаны выше.

Последнее выражение показывает, что новая частота основного резонанса значительно больше зависит от диаметра диффузора, чем от объема ящика. Чем больше объем ящика и меньше диаметр диффузора, тем меньше повышается частота основного резонанса громкоговорителя. Это хорошо иллюстрирует рис. 45, на котором представлена зависимость новой частоты основного резонанса головки от объема закрытого ящика $V_я$ для головок с одинаковой частотой основного резонанса, имеющих диффузоры диаметром 100, 150 и 200 мм. Приведенные кривые показывают, что выше некоторого значения объема ящика он мало влияет на резонансную частоту. Таким образом, для определения основной резонансной частоты громкоговорителя с акустическим оформлением в виде закрытого ящика необходимо знать гибкость подвеса или массу подвижной системы головки.

Гибкость подвижной системы можно определить, измерив смещение (провес) диффузора и катушки под влиянием дополнительного груза массой 0,2—0,4 кг, положенного на диффузор в месте соединения его со звуковой катушкой. Этот груз должен быть из немагнитного материала. Измерив смещение диффузора по удалению какой-нибудь отметки на диффузоре от линейки полоской миллиметровки, положенной на кольцо диффузородержателя, находят гибкость подвеса подвижной системы в метрах на ньютон по формуле

$$c_г = \frac{\Delta}{9,78 M},$$

где M — масса груза, кг; Δ — смещение звуковой катушки, м.

Эта формула справедлива, если масса дополнительного груза M значительно больше массы подвижной системы $m_г$. Зная основную резонансную частоту головки и гибкость подвеса, находим из формулы резонансной частоты простой колебательной системы, какой является в области основного резонанса подвижная система головки:

$$f_р = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_г c_г}},$$

ее массу в килограммах

$$m = \frac{1}{c_{\text{г}}\,(2\pi f_{\text{р}})^2}\,.$$

Массу подвижной системы головки можно определить и другим методом. К диффузору, вблизи звуковой катушки, прикрепляют кусочек пластилина массой 5—10 г и измеряют понизившуюся вследствие этого основную резонансную частоту головки. Затем, зная основные резонансные частоты головки до и после приклейки дополнительного груза ΔM, определяют массу подвижной системы по формуле

$$m_{\text{г}} = \frac{\Delta M}{(f_{\text{р}}/f_{\text{р1}})^2 - 1}\,,$$

где $f_{\text{р}}$ и $f_{\text{р1}}$ — основные резонансные частоты головки без груза и с дополнительным грузом.

Определив таким методом массу подвижной системы, можно по приведенной выше формуле для определения частоты основного резонанса узнать гибкость подвеса подвижной системы

$$c_{\text{г}} = \frac{1}{4\pi^2\, m_{\text{г}}\, f_{\text{р}}^2}\,.$$

На рис. 46 приведена номограмма, с помощью которой по задан-

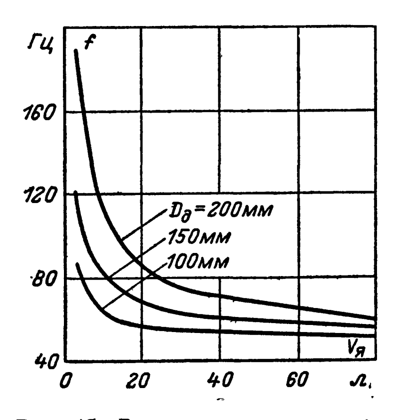


Рис. 45. Влияние диаметра диффузора головки и объема закрытого ящика $V_{\text{я}}$ на основную резонансную частоту установленной в нем головки.

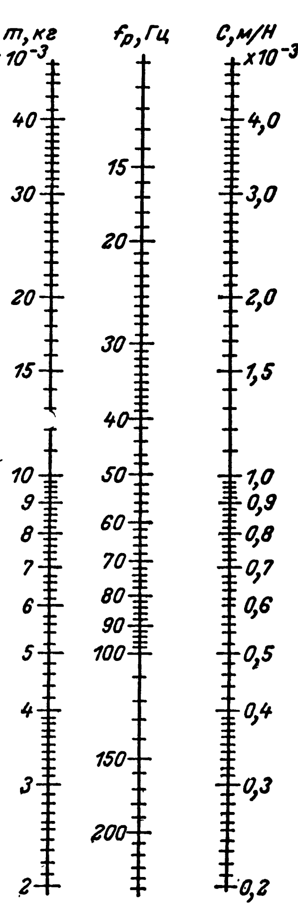


Рис. 46. Номограмма для определения резонансной частоты $f_{\text{р}}$, массы m и гибкости резонансной системы c.

ным значениям гибкости c и массы m подвижной системы можно определить резонансную частоту или наоборот. Пользование номограммой очень просто: накладывают на номограмму прозрачную линейку так, чтобы ее край совпал с делениями на шкале, соответствующими заданным значениям величин, и по пересечению края линейки с третьей шкалой определяют искомый параметр.

В качестве примера определим массу подвижной системы головки 8ГД-РР3 с частотой основного резонанса 42 Гц и новое значение основной резонансной частоты громкоговорителя в закрытом ящике объемом 50 л (0,05 м^3). Диаметр диффузора $D_д = 300$ мм $= 0{,}3$ м; его эффективная площадь $S_{д.эф} = 0{,}42 \cdot 0{,}09 = 0{,}038$ м. Груз массой $M = 0{,}2$ кг вызывает смещение звуковой катушки на величину $\Delta = 0{,}001$ м.

Следовательно, гибкость подвеса подвижной системы

$$c_г = \frac{0{,}001}{9{,}78 \cdot 0{,}2} \approx 0{,}0005 \text{ м/Н},$$

ее масса

$$m_г = \frac{1}{39{,}6 \cdot 42^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}027 \text{ кг}$$

и новое значение частоты основного резонанса

$$f'_р = \sqrt{42^2 + \frac{1{,}2 \cdot 344^2 \cdot 0{,}038^2}{30 \cdot 0{,}027 \cdot 0{,}05}} = 83 \text{ Гц}.$$

Другой пример. Головка 6ГД-2; диаметр диффузора 250 мм, а частота основного резонанса головки $f = 30$ Гц. После приклеивания к диффузору дополнительной массы $\Delta M = 0{,}005$ кг частота основного резонанса снизилась до значения 26 Гц. Следовательно, масса подвижной системы

$$m_г = \frac{0{,}005}{\left(\frac{30}{26}\right)^2 - 1} = 0{,}015 \text{ кг},$$

а гибкость ее подвеса

$$c_г = \frac{1}{(2 \cdot 3{,}14 \cdot 50)^2 \, 0{,}015} = 0{,}0019 \text{ м/Н}.$$

Каким же должен быть объем закрытого ящика? Для головки с диффузором, имеющим диаметр до 200 мм, рекомендуется применять ящик, гибкость объема воздуха в котором $c_я = (0{,}5 \div 1)\, c_г$.

В этом случае резонансная частота головки в ящике повысится в 1,73—1,41 раза, что следует из ранее приведенной формулы

$$f'_р = f_р \sqrt{\frac{c_я + c_г}{c_я}} = f_р \left(\sqrt{3} \div \sqrt{2}\right).$$

При головках большего диаметра соблюдение этого условия потребовало бы применения ящика слишком большого объема. Поэтому для таких головок следует выбирать объем ящика, исходя из допу-

стимого повышения частоты основного резонанса. Для облегчения определения резонансной частоты головки в ящике на рис. 47 приведена кривая, показывающая зависимость отношения частот головки в ящике и вне его $f_я/f_г$ от отношения гибкостей. График зависимости объема закрытого ящика $V_я$ от гибкости воздуха в нем $c_я$ для головок с диффузорами диаметром $D_д = 100 \div 375$ мм приведен на рис. 48, график учитывает эффективное значение этих диаметров.

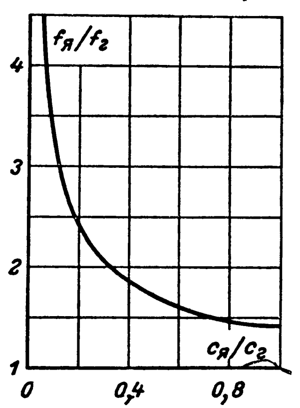


Рис. 47. Зависимость отношения резонансных частот головки в ящике и вне его от отношения гибкости воздуха в ящике и гибкости подвеса подвижной системы головки.

При выяснении необходимого объема ящика можно заменить определение массы или гибкости подвеса подвижной системы головки измерением частоты ее основного резонанса в воздухе и в закрытом ящике любого известного объема. При измерении резонанса в ящике головку достаточно приложить к отверстию соответствующего диаметра снаружи (накрыв его головкой), т. е. без всякого крепления. Однако щелей в ящике и между головкой и панелью с отверстием не должно быть.

Если резонансная частота головки в проверочном ящике объемом $V_{пров}$ окажется равной $f_я$, то для получения резонансной частоты $f_{треб}$ необходимо применить ящик объемом

$$V_{треб} = V_{пров} \frac{\left(f_я^2 - f_г^2\right)}{\left(f_{треб}^2 - f_г^2\right)}.$$

Здесь $f_г$ — основная резонансная частота головки в воздухе. Эта формула получена из выражения для резонансной частоты головки в ящике равной $f_я = f_г \sqrt{\frac{(c_г + c_я)}{c_я}}$ или $\frac{f_я}{f_г} = \sqrt{\frac{c_2}{c_я} + 1}$ и условия, что гибкость воздуха в ящике пропорциональна его объему: $c_я = 1{,}14 \frac{V}{D^4_{диф.эфф}}$.

В качестве примера определим требуемый объем ящика для громкоговорителя с головкой 10ГД-30 с тем, чтобы его резонанс находился на частоте 48 Гц. Головка 10ГД-30 имеет резонансную частоту в воздухе 30 Гц; при ее установке в закрытом ящике объемом 20 л частота резонанса повышается до 63 Гц (акустическая система 10МАС-1). Для обеспечения этого требования необходим ящик объемом

$$V_{треб.} = 20\left(\frac{63^2 - 30^2}{48^2 - 30^2}\right) = 20 \cdot 2{,}2 = 44 \text{ л}.$$

Следовательно, для того чтобы у громкоговорителя резонансная частота была равна 48 Гц, требуется ящик объемом

$$V_{\text{треб}} = k^2 V_{\text{пров}} = 1{,}7 \cdot 20 = 34 \text{ л}.$$

Дополнительно укажем, что у головки с диффузором диаметром 300 мм и частотой основного резонанса $f_р = 18$ Гц, которая помещена

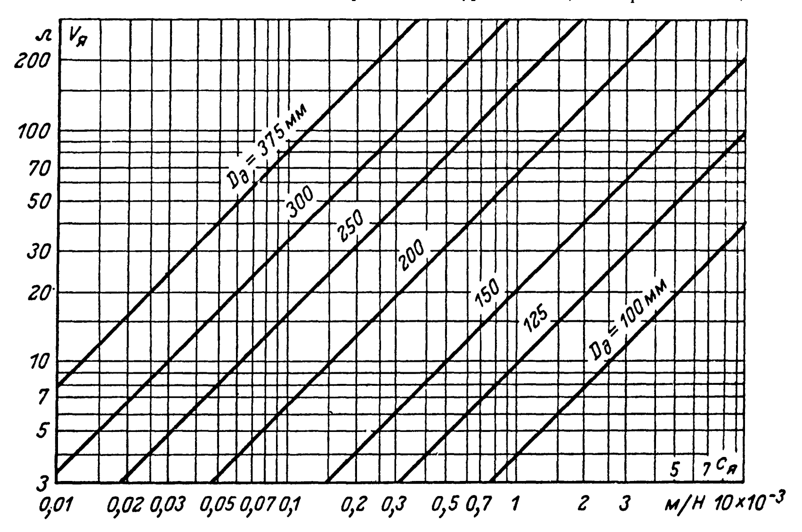


Рис. 48. Зависимость объема закрытого ящика $V_я$ от гибкости воздуха в нем и диаметра диффузора $D_д$.

в закрытый ящик объемом $V_я = 50$ л, частота основного резонанса повышается до значения $f'_р = 45$ Гц. Соответственно у головки с диффузором диаметром 200 мм и $f_р = 25$ Гц, расположенной в ящике объемом $V_я = 25$ л, частота основного резонанса увеличивается до $f'_р = 55$ Гц, а у головки с диффузором 14,5 м и $f_р = 30$ Гц, помещенной в ящик объемом $V_я = 6$ л, — до $f'_р = 85$ Гц.

За рубежом головку с очень низкой частотой основного резонанса (15—25 Гц), установленную в закрытом ящике, часто называют «акустически подвешенной». Такую головку во избежание повреждения очень податливой подвижной системы можно применять только в закрытом ящике.

Итак, основным условием использования закрытого ящика небольших габаритов является применение головки с небольшим диаметром диффузора и очень низкой частотой основного резонанса. Напомним, что в этих условиях ухудшается к. п. д. головки и ее отдача.

Смещая частоту основного резонанса, закрытый ящик вызывает дополнительные резонансные явления на более высоких частотах, ухудшающие равномерность частотной характеристики громкогово-

рителя. Для устранения создаваемых ящиком резонансов внутренние его поверхности покрывают звукопоглощающим материалом и даже заполняют им часть объема ящика.

Из сказанного следует, что головку с диффузором диаметром 250—300 мм нужно помещать в закрытый ящик объемом не менее 50 л. Если головка обладает недостаточно низкой частотой основного резонанса, то объем закрытого ящика в литрах, мало изменяющего частоту основного резонанса, $V_я = 0{,}1\ D_д^2$.

Когда же в ящик устанавливают две головки, то его размеры вычисляют по эквивалентному диаметру диффузора $D_{экв} = \sqrt{D_1^2 + D_2^2}$; при одинаковых диаметрах диффузоров $D_{экв} = 1{,}41\ D_г$. Если ящик имеет небольшой объем, то необходимо вычесть из него объем, занимаемый головками.

Внутренняя глубина ящика должна быть по крайней мере в 1,5 раза больше высоты низкочастотной головки. Излучающее отверстие для нее следует сделать такого размера, чтобы подвес диффузора не соприкасался с панелью. Заднюю стенку ящика для герметичности лучше прикреплять шурупами с прокладкой из мягкой резины или поролона. Добавляя частями звукопоглощающий материал, можно в некоторых пределах изменять частотную характеристику громкоговорителя (см. «Демпфирование громкоговорителя»). Уровень звукового давления, создаваемый громкоговорителем в закрытом ящике на частотах ниже частоты основного резонанса, снижается по 12 дБ на октаву. Не рекомендуется применять ящик, у которого размер какой-либо из сторон больше, чем в 3 раза, остальных. Этому, в частности, отвечает ящик, размеры которого соответствуют так называемой динамической симметрии, сущность которой заключается в использовании геометрических фигур с определенным соотношением размеров сторон. Это обеспечивает привлекательный внешний вид ящика. У прямоугольников принципу динамической симметрии отвечает, в в частности, соотношение сторон $1 : \sqrt{2} = 1{,}41$ (например, ширина 1000 мм, длина 1410 мм), $1 : \sqrt{3}$ или $1 : \sqrt{4}$. Некоторые фигуры, отвечающие принципу динамической симметрии, обладают свойством подобия исходной фигуре, если ее разделить на части. Например, в случае упомянутых выше прямоугольников это произойдет при делении их на 2, 3 и 4 равные части по длине.

В применении к ящику громкоговорителя или другой радиоаппаратуре принцип динамической симметрии соблюдается, в частности, при соотношении глубины, ширины и высоты, равном $1 : 1{,}41 : 2$; объем такого ящика будет численно равен размеру меньшей стороны (глубины), умноженному на $2\sqrt{2} = 2{,}82$ или кубу ширины.

По номограмме, приведенной на рис. 49, легко определить внутренние линейные размеры ящика объемом 9—240 л. Пользование номограммой весьма просто: нужно наложить на номограмму прозрачную линейку так, чтобы ее край пересекал шкалу объемов $V_я$ на соответствующем делении и тогда по точкам пересечения края линейки с остальными шкалами найдем внутренние размеры ящика: глубину a, ширину b и высоту h.

Некоторое влияние на частотную характеристику громкоговорителя оказывает внешняя конфигурация ящика вследствие дифракции. На рис. 50 приведены иллюстрирующие это влияние частотные характеристики одной и той же головки, установленной в ящиках

различной формы. Из этих характеристик видно, что чем более тупые углы имеет прилегающая к головке поверхность, тем дифракция слабее и тем ровнее частотная характеристика громкоговорителя. Наилучшей для уменьшения дифракции формой поверхности является шар (сфера). По-видимому, это привело к выпуску за рубежом закрытых систем громкоговорителей, оформленных в виде шара.

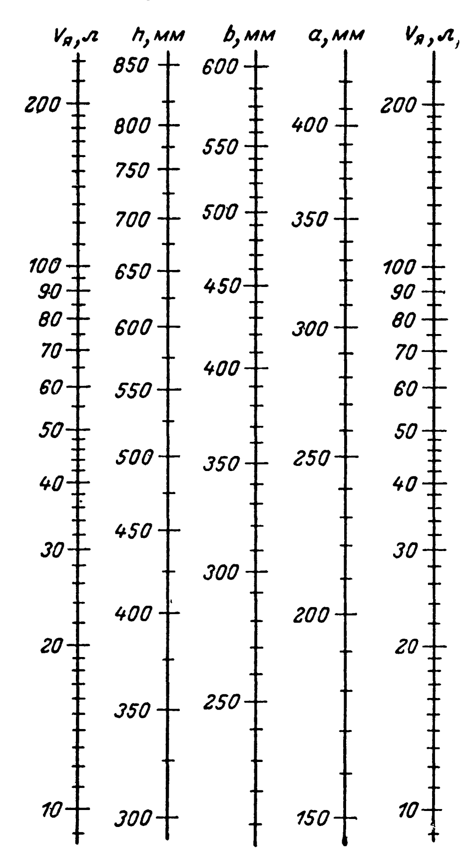


Рис. 49. Номограмма для определения внутренних размеров закрытого ящика.

В домашних условиях изготовить шар затруднительно, однако можно использовать старый или поврежденный глобус из папье-маше диаметром около 400 мм. Его объем около 34 л, что позволяет сделать довольно хороший громкоговоритель.

На рис. 51 приведена частотная характеристика шарового (сферического) громкоговорителя диаметром 400 мм в радиолюбительском исполнении. В громкоговорителе использована головка 4ГД4-РРЗ (можно применить головку 4ГД-35 или 4ГД-36) с частотой основного резонанса 45 Гц; в шаровом футляре частота основного резонанса повышается до 75 Гц. Внутренняя поверхность шара покрыта слоем стекловаты общей толщиной 12—15 мм; она помещена в мешок из стеклоткани.

Фазоинвертор. Значительное **распространение** получил фазоинвертор, представляющий собой закрытый ящик с дополнительным отверстием. Масса воздуха в отверстии ведет себя подобно диффузору, являясь дополнительным излучателем звука преимущественно на резонансной частоте фазоинвертора, которая выбирается равной основной резонансной частоте громкоговорителя (или несколько ниже).

Процесс излучения звука фазоинвертором иллюстрирует рис. 52. На резонансной частоте фазоинвертора, равной частоте воспроизводимого сигнала, создаваемое головкой звуковое давление значитель-

но меньше, чем давление, вызванное излучением дополнительного отверстия, отличаясь от него по фазе на 90°, и результирующее звуковое давление определяется главным образом излучением отверстия фазоинвертора. При частотах сигнала ниже резонансной частоты фазоинвертора создаваемое его отверстием звуковое давление

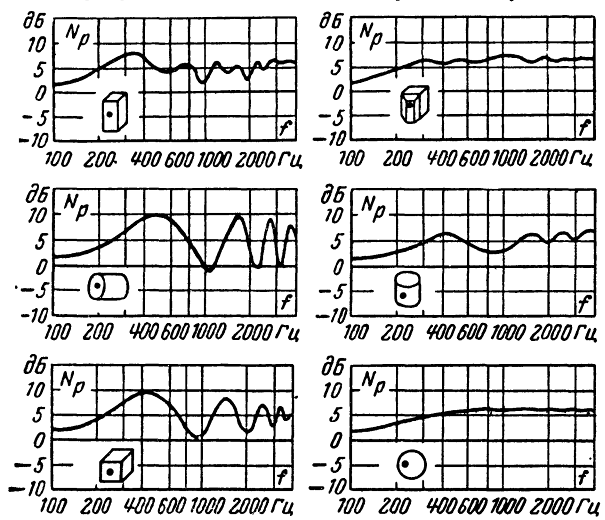


Рис. 50. Частотные характеристики головки прямого излучения, установленной в ящиках различной формы; точка обозначает местоположение головки.

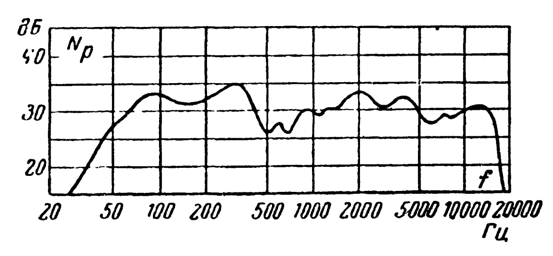


Рис. 51. Частотная характеристика головки 4ГД-4РРЗ в сферическом футляре.

уменьшается, приближаясь по значению к звуковому давлению от головки Поскольку эти давления почти противофазны, результирующее звуковое давление меньше каждого из них. При частотах сигнала выше резонансной частоты фазоинвертора создаваемое головкой звуковое давление больше давления, создаваемого отверстием фазоинвертора, они близки по фазе и поэтому складываются. При дальнейшем увеличении частоты реактивное сопротивление отвер-

стия фазоинвертора растет и он становится подобен закрытому ящику.

Итак, использование в фазоинверторе излучения задней стороны диффузора головки увеличивает отдачу на самых низких частотах. Происходит это потому, что диффузор головки через упругость воздушного объема ящика связан с массой воздуха в отверстии фазоинвертора, вследствие чего колебания воздуха в отверстии сдвинуты по фазе по отношению к колебаниям задней стороны

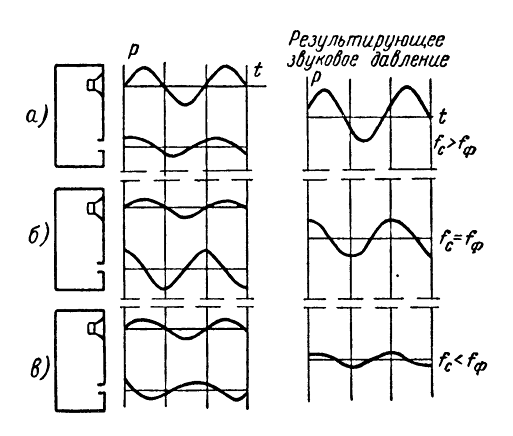


Рис. 52. Действие фазоинвертора.

а — частота излучаемого головкой звука выше резонансной частоты фазоинвертора; *б* — частоты равны; *в* — частота излучаемого головкой звука ниже резонансной частоты фазоинвертора.

диффузора. В результате колебания воздуха в отверстии почти синфазны с колебаниями передней стороны диффузора. Это обстоятельство и послужило основанием назвать такое акустическое оформление фазоинвертором[1].

Правильно сконструированный фазоинвертор не только улучшает частотную характеристику звуковоспроизведения в области низших частот, но и способствует уменьшению нелинейных искажений в области частоты основного резонанса головки. В этой области вследствие значительного возрастания амплитуды смещения звуковой катушки и диффузора начинает сказываться нелинейность их подвеса (центрирующей шайбы, краевого гофра) и непостоянство магнитной индукции в зазоре. Вследствие значительного акустического сопротивления фазоинвертора на частоте резонанса амплитуда смещения диффузора уменьшается и звуковое давление создается главным образом выходным отверстием фазоинвертора. Выше резонансной частоты фазоинвертора воздействие его на громкоговоритель уменьшается, но увеличивается активная составляющая сопротивления излучения громкоговорителя и снижается амплитуда

[1] За рубежом его называют Bass reflex system — система отражения басов или Tuned port — настроенное отверстие.

смещения звуковой катушки, поэтому нелинейные искажения не возрастают.

На рис. 53 приведены осциллограммы звукового давления тонов различных частот, создаваемых одной и той же головкой с основным резонансом на частоте 85 Гц, установленной на щите размерами 450×450 мм, и в согласованном с головкой фазоинверторе. Из осциллограмм видно, что нелинейные искажения головки с фазоинвертором меньше, чем при установке ее на щите.

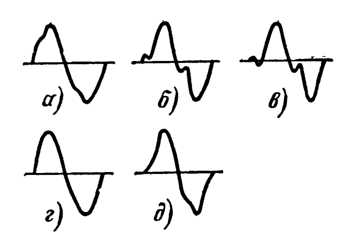


Рис. 53. Осциллограмма звукового давления, развиваемого головкой громкоговорителя.

а — в экране размером 450×450 мм, частота 100 Гц; *б* — то же, частота 85 Гц; *в* — то же, частота 50 Гц; *г* — в фазоинверторе, частота 75 Гц; *д* — то же, частота 50 Гц.

Гибкость воздушного объема ящика и масса воздуха в отверстии фазоинвертора, зависящая от площади и толщины краев отверстия, образуют резонансную систему (резонатор Гельмгольца), частота которой выражается приведенной выше формулой

$$f_\text{ф} \approx 172 \sqrt[4]{S_\text{ф}}/\sqrt{V_\text{я}}\,.$$

Из этой формулы видно, что резонансная частота меньше зависит от изменения площади отверстия, чем от объема ящика. Например, изменив площадь отверстия в 16 раз, мы изменим частоту резонанса только в 2 раза. Однако площадь отверстия определяет эффективность фазоинвертора (его отдачу) и должна приблизительно соответствовать эффективной площади диффузора (около $0{,}42\,D_\text{д}^2$), чтобы излучаемые отверстием и головкой мощности были

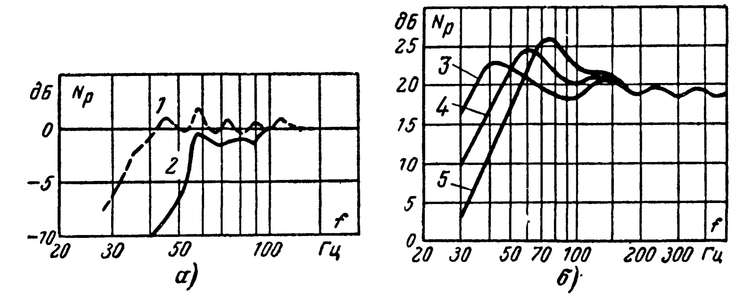


Рис. 54. Частотные характеристики головки в фазоинверторах различных объемов (*а*) и при различных площадях отверстия (*б*).

1 — объем фазоинвертора 238 л; *2* — то же 57 л; *3* — отверстие малой площади; *4* — то же средней площади; *5* — то же большой площади.

соизмеримы. Так как площадь отверстия фазоинвертора при одной и той же резонансной частоте зависит от объема фазоинвертора, необходимо использовать ящик определенного объема в зависимости от размеров головки.

Это подтверждается рис. 54, *а*, где показаны частотные характеристики головок с диффузором диаметром 250 мм и эффективной площадью около 400 см^2, установленных в ящиках с фазоинверторами, настроенными на одну и ту же частоту 40 Гц, но двух различных объемов (57 и 238 л) и имеющими отверстия соответственно разной площади (28 и 410 см^2). Уровень звукового давления у фазоинвертора с ящиком большего объема и с площадью отверстия, почти равной площади диффузора, на резонансной частоте 40 Гц почти на 10 дБ больше, чем у фазоинвертора с ящиком меньшего объема. Другой иллюстрацией зависимости отдачи фазоинвертора от площади его отверстия могут служить частотные характеристики головки с основным резонансом на частоте 30 Гц при неизменном объеме ящика фазоинвертора, но различных площадях отверстия (рис. 54, *б*). Из рисунка видно, что увеличение площади отверстия повышает резонансный пик и, следовательно, отдачу, причем это сопровождается и повышением частоты резонанса. Как показали эксперименты, отношение сторон прямоугольного отверстия оказывает небольшое влияние на резонансную частоту фазоинвертора. При увеличении отношения сторон отверстия от 2 до 16 резонансная частота повышается на 6—12%. Конфигурация ящика фазоинвертора при отношении его сторон до 1 : 3 не влияет существенно на частоту резонанса.

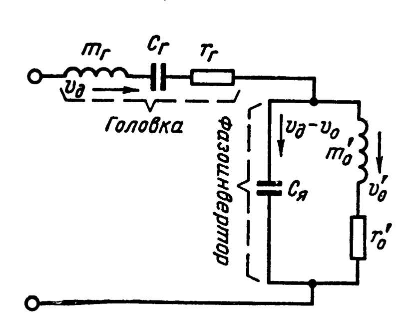


Рис. 55. Схема электрического аналога фазоинвертора.

Механико-акустическая система фазоинвертора с головкой может быть изображена схемой ее электрического аналога, в которой головка представлена последовательным, а фазоинвертор — параллельным колебательным контуром, и оба контура соединены последовательно (рис. 55). Здесь $m_г$, $c_г$, $r_г$ — параметры подвижной системы головки: масса, гибкость подвеса, трение подвеса и активная составляющая сопротивления излучения; $c_я$ — гибкость объема воздуха в ящике; r_0', m_0' — приведенные активная составляющая сопротивления излучения и масса воздуха в отверстии с учетом соколеблющейся массы воздушной среды. Эта схема позволяет объяснить наличие двух максимумов в частотной характеристике модуля полного сопротивления головки в фазоинверторе как следствие сильной связи двух резонансных контуров; чем сильнее связь между контурами, тем больше разнесены максимумы (пики). В фазоинверторе степень связи обратно пропорциональна объему ящика. В ящике относительно малого объема создается более сильная связь и резо-

нансные пики больше разнесены. В больших ящиках связь слабее и максимумы сближаются. Эту особенность фазоинвертора иллюстрирует рис. 56, на котором приведена частотная характеристика модуля полного сопротивления головки в свободном пространстве (кривая *1*) и этой же головки в двух фазоинверторах, настроенных на основную резонансную частоту головки $f_р = 45$ Гц, но различного объема: 138 л (кривая *2*) и 21 л (кривая *3*). Как видно, при увеличении связи частоты максимумов раздвигаются, а глубина провала между ними увеличивается. В большем фазоинверторе отно-

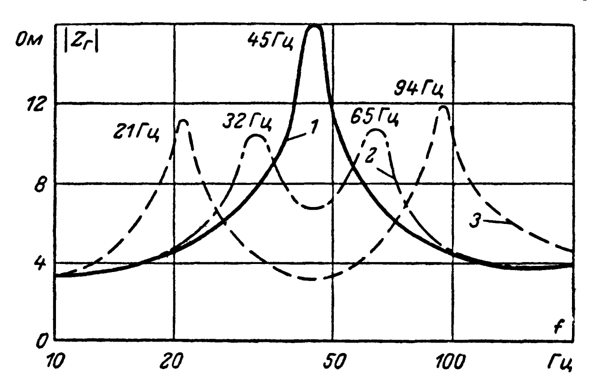


Рис. 56. Частотные характеристики модуля полного сопротивления головки.

1 — в экране; *2* — в фазоинверторе объемом 138 л; *3* — то же объемом 21 л.

шение частот максимумов приблизительно равно 2, а в меньшем фазоинверторе увеличивается до 4,5. Частота минимума обеих кривых модуля полного сопротивления равна резонансной частоте фазоинвертора и головки.

Степень связи между головкой и фазоинвертором и ее влияние на частотную характеристику зависят от отношения гибкости подвеса подвижной системы головки громкоговорителя $c_г$ к гибкости объема воздуха в ящике $c_я$. Оптимальное значение этого отношения $c_г/c_я \approx 1{,}41$; при таком отношении гибкостей частоты максимумов на характеристике модуля полного сопротивления относятся как 3,13:1. Если используется головка с большой гибкостью подвеса и соответственно низкой частотой основного резонанса, то фазоинвертор будет удовлетворительно работать и при большем значении $c_г/c_я$, т. е. его ящик может иметь меньший объем. Это очень важно потому, что для подобной головки с диффузором диаметром 300 мм при соблюдении оптимального отношения гибкостей потребовался бы ящик объемом 270—400 л, что для жилых помещений совершенно неприемлемо. Для низкочастотной головки с диффузором диаметром 200 мм (подобной 8ГД-1) оптимальный объем ящика фазоинвертора 54 л, а для головки с диффузором диаметром 150 мм (подобной 10ГД-30) 14—21 л. Здесь, как и в случае закрытого ящика, для уменьшения объема фазоинвертора следует применять головки меньшего диаметра и с более низкой частотой основного

резонанса (в закрытом ящике последнее требование обусловливалось снижением низшей граничной частоты). Кроме того, при конструировании фазоинвертора нужно учитывать, что при малом объеме ящика, когда частотный интервал между максимумами модуля полного сопротивления увеличивается, более высокий из них может оказаться около частоты 100 Гц, а это приведет к бубнящей передаче звука. Устранить этот недостаток очень трудно. Определить гибкость подвижной системы головки можно по приведенной выше методике. Гибкость воздуха и размеры сторон ящика находят по графикам на рис. 62 и 63. При определении объема ящика фазоинвертора и возможности его варьирования рекомендуется отдать предпочтение большему объему. Если имеется готовый ящик с отверстием для головки, отношение гибкостей можно определить экспериментально. Головку устанавливают в ящик (или прикладывают к отверстию снаружи), плотно закрывают отверстие фазоинвертора, если таковое имеется, и измеряют основную резонансную частоту головки. Отношение гибкостей определяют по формуле

$$\frac{c_{\text{г}}}{c_{\text{я}}} = \left(\frac{f'_{\text{р}}}{f_{\text{р}}}\right)^2 - 1,$$

где $f_{\text{р}}$ — основная резонансная частота головки в свободном пространстве; $f'_{\text{р}}$ — то же в ящике.

Если головка прикладывается к отверстию снаружи, следует иметь в виду, что чистый объем ящика увеличивался на объем, занимаемый головкой.

Поскольку фазоинвертор представляет собой простую резонансную систему, то резонанс наступает, когда становятся равными реактивные сопротивления гибкости объема воздуха в ящике $c_{\text{я}}$ и массы воздуха в отверстии и соколеблющейся с ним массы воздушной среды m_0, т. е. $1/(2\pi f_{\text{ф}} c_{\text{я}}) = 2\pi f_{\text{ф}} m_0$; отсюда резонансная частота фазоинвертора

$$f_{\text{ф}} = 1/\left(2\pi \sqrt{2m_0 c_{\text{я}}}\right).$$

Эта формула показывает, что увеличение гибкости воздушного объема и массы воздуха в отверстии снижают резонансную частоту фазоинвертора.

Увеличить гибкость воздуха в ящике можно увеличением его объема; увеличение массы воздуха, заключенного в объеме отверстия, должно сопровождаться увеличением объема отверстия, т. е. его площади и глубины. Но приведенная ранее формула для определения резонансной частоты фазоинвертора противоречит этому, ибо согласно ей увеличение площади отверстия повышает его резонансную частоту, а уменьшение — снижает. Причина этого противоречия заключается в том, что увеличение площади отверстия S_0 хотя и увеличивает пропорционально массу воздуха в отверстии, но одновременно уменьшает гибкость воздуха в ящике и притом непропорционально увеличению его массы. Это следует из вышеприведенной формулы для определения гибкости объема воздуха. Поэтому в подобных случаях вместо массы воздуха в отверстии m_0 иногда вводят понятие инерциальности отверстия, которое выражается соотношением: $m_{\text{и}} = m_0/S_0^2$.

Подставив в формулу для резонансной частоты фазоинвертора вместо массы воздуха инерциальность отверстия, получим:

$$f'_{\text{ф}} = \frac{S_0}{2\pi \sqrt{m_0 c_{\text{я}}}},$$

т. е. резонансная частота пропорциональна площади отверстия и больше зависит от нее, чем от массы воздуха в отверстии.

Следовательно, если, не изменяя площадь отверстия фазоинвертора, увеличить толщину его краев или сделать проход, то с увеличением массы воздуха в отверстии резонансная частота фазоинвертора будет снижаться. Утолщение краев отверстия (добавление прохода) позволяет существенно уменьшить объем ящика и площадь отверстия без повышения резонансной частоты фазоинвертора, что очень важно. Формула для определения частоты резонанса фазоинвертора $f_{\text{ф}}$, содержащая экспериментально установленные поправки на толщину краев отверстия (длину прохода) и соотношение сторон прямоугольного отверстия (при круглом отверстии это отношение равно единице), имеет вид:

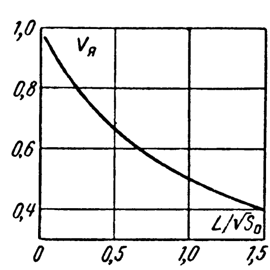


Рис. 57. Зависимость объема фазоинвертора от длины прохода (толщины краев отверстия).

$$f^2_{\text{ф}} = 3 \cdot 10^8 \frac{S_0 k^{0,12}}{V_{\text{я}} \left(L + S_0^{0,5}\right)},$$

где S_0 — площадь отверстия, см²; k — отношение размеров сторон отверстия; $V_{\text{я}}$ — объем ящика, л; L — толщина краев отверстия (длина прохода), см.

Преобразовав эту формулу относительно объема

$$V_{\text{я}} = 3 \cdot 10^8 \frac{S_0 k^{0,12}}{f^2_{\text{ф}} \left(L + S_0^{0,5}\right)},$$

можно получить данные о влиянии толщины краев отверстия на объем ящика при неизменной резонансной частоте. Кривая на рис. 57 показывает, что увеличение длины прохода до значения $L = \sqrt{S_0}$ позволяет уменьшить вдвое объем ящика. При этом следует иметь в виду, что длина прохода не должна превышать 0,1 длины волны, соответствующей резонансной частоте, т. е. длина его в миллиметрах должна быть не более $34 \cdot 10^3 / f_{\text{ф}}$.

Площадь отверстия фазоинвертора может быть выбрана в пределах от значения, равного эффективной площади диффузора $S_{\text{д.эф}} = 0{,}42\, D^2_{\text{д}}$ до $0{,}2\, D^2_{\text{д}}$. Если отверстие круглое, то его диаметр может быть равен 0,35—0,75 полного диаметра диффузора.

Может показаться, что последние приведенные данные находятся в противоречии с тем, что говорилось выше о влиянии пло-

щади отверстия фазоинвертора на эффективность работы последнего. Однако это противоречие кажущееся: дело в том, что создаваемое отверстием фазоинвертора звуковое давление пропорционально колебательной скорости массы воздуха в отверстии, а последняя зависит от колебательной скорости диффузора головки и размеров отверстия.

Разберем подробнее действие фазоинвертора. Учитывая, что в схеме электрического аналога фазоинвертора с головкой (рис. 55) колебательная скорость эквивалентна току, а отношение токов в ветвях электрической цепи равно отношению проводимостей, при частоте сигнала, равной резонансной частоте фазоинвертора $f_ф$, отношение колебательных скоростей в ветвях контура фазоинвертора определяют по формуле

$$\frac{v_д - v_0'}{v_0'} = \frac{r_0' + j2\pi f m_0'}{1/j2\pi f c_я}.$$

Так как $f_ф = 1/\left(2\pi\sqrt{c_я m_0}\right)$, а $c_я = 1/(4\pi^2 f_ф m_0)$, то

$$\frac{v_д - v_0'}{v_0'} = f\,\frac{r_0'}{2\pi f m_0'} - 1.$$

Отсюда следует, что модуль отношения колебательных скоростей движения воздуха в отверстии фазоинвертора и диффузора

$$\left|\frac{v_0'}{v_д}\right| = 2\pi m_0'/r_0' = Q_ф.$$

В этих формулах: f — частота сигнала; m_0' — сумма массы воздуха в отверстии фазоинвертора и соколеблющейся массы воздуха; r_0' — активная составляющая сопротивления излучения фазоинвертора и активные потери при колебаниях массы воздуха в отверстии (звукопоглощение).

Отсюда $v_0' = v_д Q_ф$, т. е. колебательная скорость воздуха в отверстии фазоинвертора и создаваемое им звуковое давление пропорциональны колебательной скорости диффузора головки и добротности фазоинвертора, определяемой, в частности, массой воздуха в отверстии; это относится к случаю, когда площади отверстий фазоинвертора S_0 и диффузора $S_д$ одинаковы. Если же площади этих отверстий не равны, то колебательная скорость воздуха в отверстии фазоинвертора $v_0' = v_д Q_ф S_0/S_д$. Это выражение показывает, что в последнем случае эффективность фазоинвертора зависит также от отношения площадей отверстий. Однако если даже площадь отверстия фазоинвертора S_0 будет в 4 раза меньше площади отверстия для диффузора, то нетрудно сохранить неизменной, даже увеличить, добротность фазоинвертора, увеличив длину прохода. На практике увеличение длины прохода дает возможность уменьшить объем ящика фазоинвертора и сохранить достаточную его добротность.

Следует, однако, иметь в виду, что увеличение добротности фазоинвертора ведет к ухудшению его переходных характеристик

из-за того, что собственные колебания большой массы воздуха в отверстии могут затухать в течение 30—40 мс после прекращения колебаний диффузора. Поэтому не нужно делать ящики очень малого объема.

На рис. 58 показан внутренний вид современного двухполосного громкоговорителя с фазоинвертором объемом около 90 л (780×460×250 мм). Диаметр диффузора низкочастотной головки равен 320 мм; длина прохода фазоинвертора 100 мм; диаметр прохода 70 мм. Резонансная частота фазоинвертора около 30 Гц.

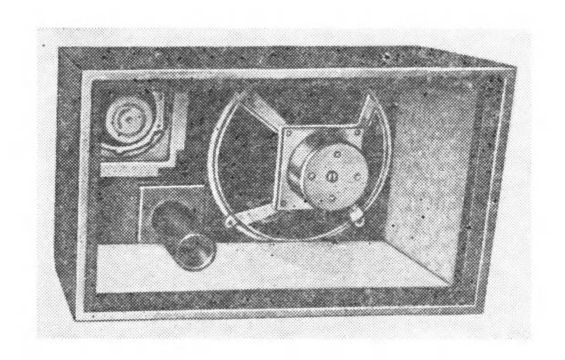


Рис. 58. Внутренний вид громкоговорителя с фазоинвертором.

На рис. 59, *а* показан вид со стороны передней панели четырехполосного громкоговорителя японской фирмы Akai (декоративная сетка снята). Объем его фазоинвертора около 60 л; диаметр отверстия прохода 75 мм; номинальный диапазон частот 25 Гц—21 кГц.

В последнее время стали применять рупорные излучатели в качестве высокочастотных головок не только в кинотеатральных установках, но и в громкоговорителях бытовой звуковоспроизводящей аппаратуры. Один из таких двухполосных громкоговорителей с фазоинвертором, выпускаемых вышеупомянутой японской фирмой, показан на рис 59, *б*; 8-секционный рупорный излучатель и низкочастотная головка, применяемые в этом громкоговорителе, изображены отдельно на рис. 59, *в*. Номинальная мощность этого громкоговорителя 30 Вт, номинальный диапазон воспроизводимых частот 45 Гц—20 кГц, диаметр диффузора низкочастотной головки около 200 мм.

Фазоинвертор с проходом, так же как и с отверстием, конструируют с соблюдением оптимального отношения гибкостей $c_г/c_я \approx 1,41$. Объем ящика зависит от гибкости подвеса подвижной системы головки. Длину прохода можно определить по приведенной выше формуле для данных объема и резонансной частоты фазоинвертора, равной частоте основного резонанса головки, выбрав площадь отверстия в пределах 20—110 см^2. При круглом отверстии эта площадь приблизительно соответствует диаметру 50—120 мм.

На рис. 60 приведены кривые, по которым можно определить длину прохода при различных значениях резонансной частоты и объема ящика фазоинвертора.

Пример. Резонансная частота фазоинвертора 32 Гц, объем ящика 56 л. Выбираем диаметр прохода 75 мм. Чтобы найти длину

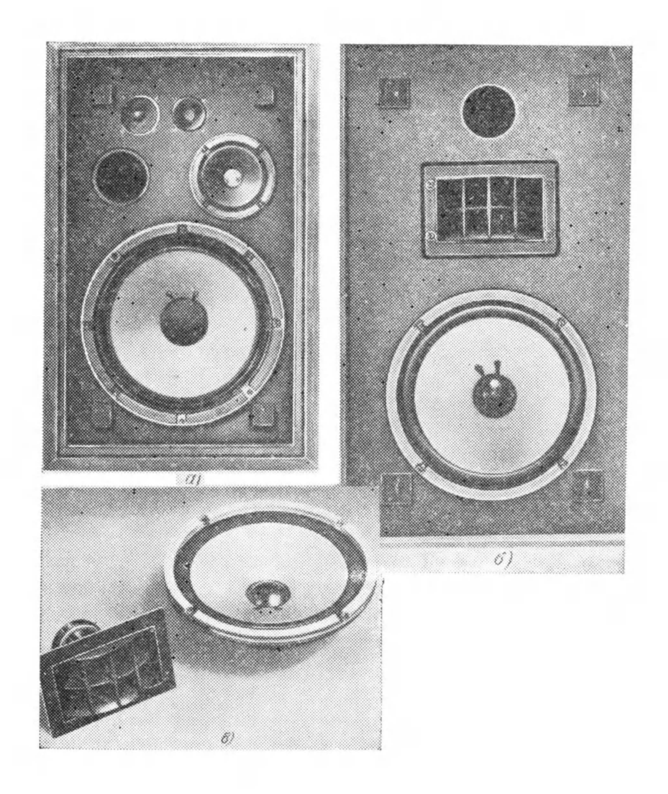


Рис. 59. Громкоговорители с фазоинверторами фирмы Akai.

а — четырехполосный SW 155 с головками прямого излучения; *б* — двухполосный SW 126 с рупорной высокочастотной и низкочастотной головкой прямого излучения; *в* — рупорная и низкочастотная головки громкоговорителя SW 126.

последнего, восстанавливаем на рис. 60, *б* перпендикуляр, проходящий через отметку на горизонтальной шкале, соответствующую этой частоте, и ведем его до пересечения с кривой $V_я \approx 56$ л. Затем от точки пересечения перпендикуляра с этой кривой проводим горизонтальную линию и в точке ее пересечения с вертикальной шкалой (длина прохода) находим, что проход должен иметь длину 170 мм.

Если на графике нет кривой, соответствующей необходимому объему ящика, ее следует провести между кривыми для наиболее

близких значений объема. Так, например, если объем ящика равен не 56, а 75 л, то для того, чтобы провести дополнительную кривую, необходимо пропорционально разделить горизонтальные промежутки между кривыми для объемов 66 и 82 л; точки, лежащие на кривой для объема 75 л, должны находиться на расстояниях, равных

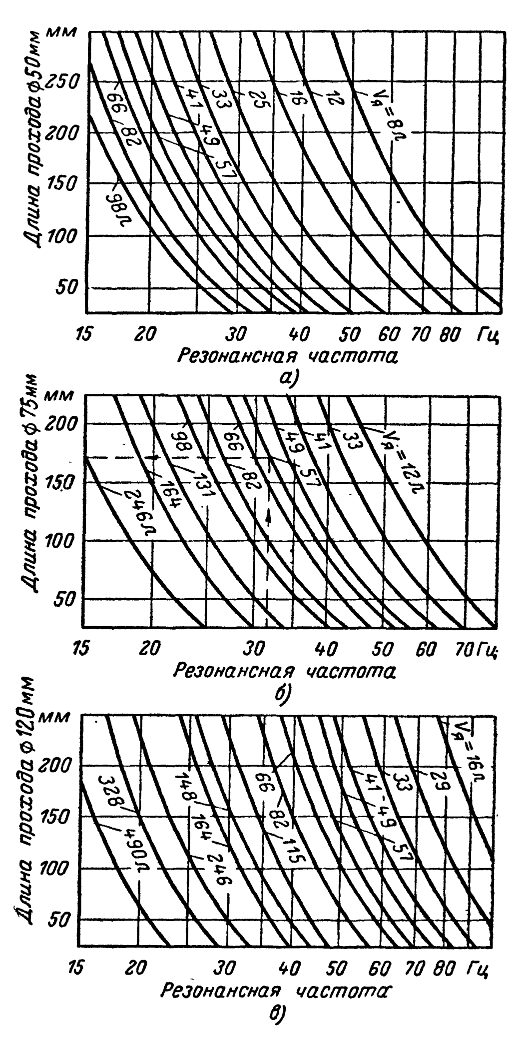


Рис. 60. Кривые для определения длин проходов фазоинверторов при различных объемах ящиков.

а — для диаметра прохода 50 мм; *б* — то же 75 мм; *в* — то же 120 мм.

$\frac{82-75}{82-66}=0{,}44$ длины горизонтального промежутка, считая от кривой для объема 82 л. Конечно, достаточно провести лишь отрезок дополнительной кривой около перпендикуляра, восстановленного через точку шкалы частот для 32 Гц.

Представление о конструкциях фазоинверторов дает рис. 61; здесь *1* — отверстие для излучения звука передней стороной диффузора головки; *2* — отверстие (трубка) фазоинвертора; *3* — звукопоглощающее покрытие; *4* — деревянный щит.

Конструкции, представленные на рис. 61, *а*, *б*, не нуждаются в пояснениях. В третьей, довольно оригинальной конструкции (рис 61, *в*) излучение звука фазоинвертором осуществляется через то же отверстие, через которое излучает и передняя сторона диффузора головки. Для этой цели она установлена на некотором расстоянии от передней панели фазоинвертора, на щите *4*. Расчетным размером отверстия фазоинвертора является размер кольцеобразного прохода между передней панелью фазоинвертора и щитом *4*, на котором установлена головка. Площадь этого отверстия равна произведению длины окружности на ширину щели. Щит необходим здесь не только для образования прохода, но и для устранения «акустического короткого замыкания» низкочастотных звуков выше резонансной частоты.

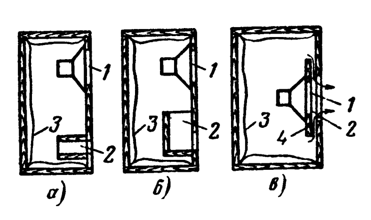


Рис. 61. Конструктивные варианты фазоинверторов.

Отверстие фазоинвертора рекомендуется делать не ближе 80 мм от головки, можно даже на другой стороне ящика. Может быть сделано два отверстия вдвое меньшей площади.

Если в фазоинверторе используется проход, то расстояние между его концом и задней стенкой ящика должно быть не менее 40 мм. Выполнение этого требования может привести в отдельных случаях к необходимости внесения поправок в расчет фазоинвертора, которые позволят уменьшить длину прохода за счет уменьшения площади его сечения.

Из числа известных конструкций проходов наиболее простым является проход в виде трубы (рис. 61, *а*). Ее можно изготовить из нескольких слоев картона или чертежной бумаги. Для обеспечения жесткости трубы слои картона (бумаги) склеивают на болванке нужного диаметра столярным клеем или эпоксидной смолой. Можно изготовить трубу квадратного сечения, склеив ее из фанеры или жесткой пластмассы. Помимо простоты изготовления, конструкция прохода с трубкой удобна для настройки фазоинвертора.

Правильность расчета и изготовления фазоинвертора, а также его согласования с головкой можно проверить измерением частотной характеристики модуля полного сопротивления или частотной характеристики звукового давления, развиваемого громкоговорителем в области частот приблизительно ниже 500 Гц. Первый метод проверки проще, так как для его использования нужно меньше измерительной аппаратуры и измерение можно произвести в незаглушенном помещении.

Второй метод несколько сложнее, но он дает более полные сведения о работе громкоговорителя с фазоинвертором.

Принято считать, что у правильно настроенного фазоинвертора на частотной характеристике модуля полного сопротивления громкоговорителя оба пика должны иметь приблизительно равную высоту и располагаться симметрично относительно резонансной частоты головки (при построении характеристики в логарифмическом масштабе частоты). Высота пиков зависит от типа звукопоглощающего материала и конструкции ящика. Вибрации последнего поглощают на низших частотах часть энергии; на частоте 40 Гц она может достигать 50% энергии, поглощаемой звукопоглощающим материалом толщиной около 70 мм, расположенным на стенках ящика. Но уже на частоте 80 Гц положение меняется: звукопоглощающий материал становится основным поглотителем энергии. Это может изменить звукопоглощение на частотах, соответствующих максимумам модуля полного сопротивления, и сделать их неодинаковыми по высоте. Поэтому проще всего, если известна основная резонансная частота головки в открытом пространстве, настраивать фазоинвертор по минимуму модуля полного сопротивления на этой частоте. При этом не нужно измерять частотную характеристику модуля полного сопротивления, а достаточно отыскать минимальное его значение между двумя подъемами.

Фазоинвертор без прохода настраивают, закрывая часть отверстия дощечкой, жестко прикрепляемой винтами, или с помощью струбцинок; рекомендуется для облегчения настройки сделать отверстие на 20—30% больше расчетного. Настройку фазоинвертора с проходом производят изменением длины трубки. Это удобно осуществить, сделав на трубку подвижную насадку, перемещением которой можно изменять общую длину трубки до установления окончательного ее значения.

Трубка должна плотно входить в переднюю панель фазоинвертора, а имеющиеся щели заделаны, например, пластилином. Подвижная насадка должна быть жесткой и плотно надеваться на трубку; щели между нею и трубкой также заделывают.

В ящике фазоинвертора могут быть также установлены высокочастотные и среднечастотные головки. В этом случае фазоинвертор является двух- или трехполосным громкоговорителем (акустической системой).

Если задние стороны высокочастотной и среднечастотной головок прямого излучения являются открытыми, то эти головки следует изолировать от внутреннего объема ящика жестким колпаком (кожухом), чтобы устранить возможность воздействия на них звуковых колебаний низкочастотной головки. При этом нужно учитывать уменьшение объема ящика.

Уменьшение объема ящика фазоинвертора особенно существенно, если его объем не более 50 л. В этих случаях следует учитывать как объем низкочастотной головки, так и объем прохода вместе с его стенками. Для удобства расчетов указывают ориентировочные объемы головок с диффузорами различного диаметра.

Диаметр диффузора, мм	Объем головки, л
150	2,5
200	4,0
250	6,5
300	10,0

Внутренняя поверхность фазоинвертора должна быть покрыта звукопоглощающим материалом во избежание возникновения собственных (резонансных) колебаний воздуха внутри ящика, ухудшающих частотную характеристику громкоговорителя.

Звукопоглощающим материалом толщиной 30—60 мм покрывают всю внутреннюю поверхность ящика, за исключением панели, на которой укреплена головка. Чтобы увеличить звукопоглощение, этот материал лучше поместить на расстоянии 20—50 мм от стенок ящика. Хорошие результаты дает покрытие звукопоглощающим материалом корпуса головки и подвешивание звукопоглотителя в виде валика, поперек ящика. Как уже указывалось выше, звукопоглощение, изменяя добротность фазоинвертора, способно изменить отдачу на низших частотах и тембр звучания. Размещать звукопоглощающий материал вблизи отверстия (прохода) фазоинвертора нужно с осторожностью, так как чрезмерно сильное демпфирование может привести практически к прекращению действия фазоинвертора.

Ящик фазоинвертора может быть и непрямоугольной формы. Иногда может оказаться удобным поместить фазоинвертор в углу помещения; тогда ему придают форму трехгранной призмы.

Фазоинвертор с пассивным излучателем. Существует разновидность фазоинвертора, которая имеет несколько названий, но наиболее правильным является: фазоинвертор с пассивным излучателем (радиатором). Его особенность заключается в том, что в отверстии фазоинвертора устанавливают подвижную систему второй головки с удаленными магнитной системой и центрирующей шайбой. Диаметр диффузора пассивного излучателя $D_{рад}$ приблизительно равен диаметру диффузора головки. Звуковую катушку отрезают лезвием бритвы, заклеивают отверстие в диффузоре диском из плотной бумаги и прикрепляют в этом месте к диффузору дополнительный груз. Его массу выбирают в зависимости от объема ящика, диаметра диффузора и резонансной частоты фазоинвертора, которая должна быть равна частоте основного резонанса головки.

Принцип действия фазоинвертора с пассивным излучателем аналогичен принципу действия обычного фазоинвертора. На резонансной частоте фазоинвертора диффузор пассивного излучателя колеблется и излучает синфазно с диффузором головки, обеспечивая эффективное воспроизведение звуков низших частот. Отличие состоит в том, что масса воздуха в отверстии (проходе) заменена массой подвижной системы пассивного излучателя, включая дополнительный груз.

Изменяя массу этого груза, значительно проще изменять резонансную частоту фазоинвертора, чем размеры отверстия или прохода в обычном фазоинверторе.

Для уменьшения объема ящика обычного фазоинвертора приходится увеличивать длину прохода или уменьшать площадь отверстия, что снижает эффективность фазоинвертора. Фазоинвертор с пассивным излучателем свободен от этого недостатка. Другим его положительным свойством является то, что фазовый сдвиг колебаний обоих диффузоров в области резонанса близок к нулю, что способствует улучшению эффективности громкоговорителя.

Хотя площадь пассивного излучателя приблизительно равна площади диффузора головки, т. е. значительно больше площади отверстия или прохода фазоинвертора, дополнительным грузом на пассивном излучателе нетрудно снизить резонансную частоту фазо-

инвертора. В обычном фазоинверторе для этого приходится увеличивать длину прохода.

Резонансная частота фазоинвертора с пассивным излучателем (как и обычного)

$$f_ф = 1/\left(2\pi \sqrt{m_ф c_ф}\right),$$

где $m_ф$ — сумма масс подвижной системы пассивного излучателя и присоединенного к диффузору соколеблющегося воздуха, кг; $c_ф$ — общая гибкость объема воздуха в ящике и подвеса дополнительной подвижной системы, м/Н.

Поскольку гибкость подвеса диффузора пассивного излучателя $c_{под}$ значительно больше гибкости воздушного объема ящика $c_я$, считая, что $c_ф \approx c_я$, (влиянием гибкости подвеса диффузора на общую гибкость пренебрегаем [1]).

Расчет фазоинвертора с пассивным излучателем производят, исходя из оптимального отношения гибкостей подвеса подвижной системы головки и воздушного объема ящика, которое равно $c_г/c_я \approx 1{,}41$. Определив одним из описанных выше методов гибкость подвеса подвижной системы головки, по графику на рис. 48 находят объем ящика, соответствующий оптимальному отношению гибкостей. Затем, приняв, как обычно, резонансную частоту фазоинвертора равной основной резонансной частоте головки, находят массу пассивного излучателя в килограммах по формуле

$$m_ф = 1/\left(4\pi^2 f_ф^2 c_ф\right).$$

Как сказано выше, эта масса состоит из двух частей: массы диффузора пассивного излучателя с грузом $m_{рад}$ и присоединенной с двух сторон излучателя массы соколеблющегося воздуха Δm, т. е. $m_ф = m_{рад} + \Delta m$. Последняя зависит только от эффективного диаметра диффузора; масса ее в граммах равна $\Delta m = 8 \cdot 10^{-4} D^3_{рад.эф}$.

Практически массу пассивного излучателя можно принять равной массе груза, поскольку массой диффузора можно пренебречь. На рис. 62 приведена кривая зависимости присоединенной массы от номинального (фактического) диаметра диффузора головки, учитывающая его эффективный диаметр. В качестве примера определим массу груза, который должен быть помещен на диффузоре пассивного излучателя диаметром $D_{рад} = 220$ мм, с головкой диффузора диаметром 250 мм, устанавливаемой в ящике фазоинвертора объемом $V_я = 50$ л, при резонансной частоте головки и фазоинвертора $f_ф = 45$ Гц. По графику рис. 48 находим гибкость воздуха в ящике этого объема при диффузоре диаметром 250 мм; эта гибкость равна $c_я = 0{,}32 \cdot 10^{-3}$ м/Н. Полная масса пассивного излучателя должна быть равна:

$$m_ф = \frac{1}{4\pi^2 f_ф^2 c_я} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 45^2 \cdot 0{,}32 \cdot 10^{-3}} = 0{,}038 \text{ кг}.$$

По кривой рис. 62 определяем присоединенную к диффузору пассивного излучателя массу Δm, которая составляет 5 г. Следова-

[1] Общая гибкость $c_ф = \dfrac{c_{под} c_я}{c_{под} + c_я}$. Когда $c_{под} \gg c_я$, то $c_ф \approx c_я$.

тельно, для получения заданной резонансной частоты необходимо установить на диффузоре дополнительный груз, обладающий массой $m_{рад}=m_{ф}-\Delta m=38-5=33$ г.

Дополнительный груз представляет собой металлический диск диаметром d, приблизительно равным диаметру звуковой катушки. Толщина стального диска в миллиметрах должна быть равна $h=0{,}16\ m_{рад}/d^2$.

Магнитную систему и центрирующий диск удаляют из головки, которая предназначается для пассивного излучателя, для того чтобы увеличить гибкость подвеса и линейность движения подвижной системы, а также устранить возможность задевания звуковой катушки. При этом действующий объем ящика почти не уменьшается.

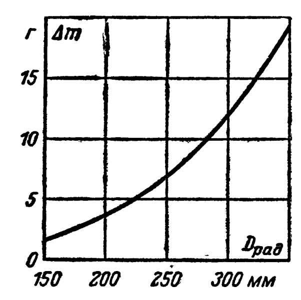


Рис. 62. Зависимость присоединенной массы от диаметра диффузора пассивного излучателя $D_{рад}$.

Основная резонансная частота головки, предназначаемой для пассивного излучателя, не имеет существенного значения. Удобно использовать в качестве пассивного излучателя диффузор от головки с поврежденной звуковой катушкой или головки давнего выпуска с катушкой для подмагничивания. Пассивный излучатель можно также изготовить из диска, вырезанного из пластины легкого пенопласта типа ПС-1 (белый) или ПХВ-1 (желтый) плотностью около 60 кг/м^3 и толщиной около 5 мм. Но в этом случае придется сделать гибкий подвес, руководствуясь указаниями, приведенными в конце этой книги. Массу пенопластового диска необходимо учитывать при определении массы груза. Возможно, что пассивный излучатель с массой, найденной расчетом, можно будет изготовить из дюралюминия толщиной около 1 мм. Диаметр диффузора или диска пассивного излучателя должен быть приблизительно равен диаметру диффузора головки.

Хотя закрытый фазоинвертор легко изготовить с низкой резонансной частотой (даже при малом объеме ящика), его объем не должен быть меньше 30—40 л для резонансной частоты ниже 60—50 Гц, так как увеличение массы подвижной системы пассивного излучателя, как и увеличение массы воздуха в проходе фазоинвертора, ухудшает переходные характеристики громкоговорителя.

Все, что сказано выше о звукопоглощении внутри обычного фазоинвертора и проверке правильности его настройки, полностью относится и к фазоинвертору с пассивным излучателем. Отличие состоит лишь в том, что настройку последнего осуществляют изменением дополнительного груза на диффузоре. Правильность настройки фазоинвертора иногда можно проверить, наблюдая колебания пассивного излучателя.

Представление о пассивном излучателе, расположенном рядом с головкой, дает рис. 63, на котором виден дополнительный груз в виде диска, прикрепленного в центре диффузора болтом.

На рис. 64 приведены частотные характеристики громкоговорителя с головкой, имеющей резонансную частоту 53 Гц и диффузор

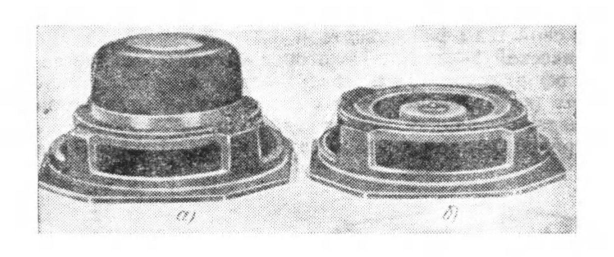


Рис. 63. Пассивный излучатель (*б*) и головка прямого излучения (*а*), из которой он был изготовлен.

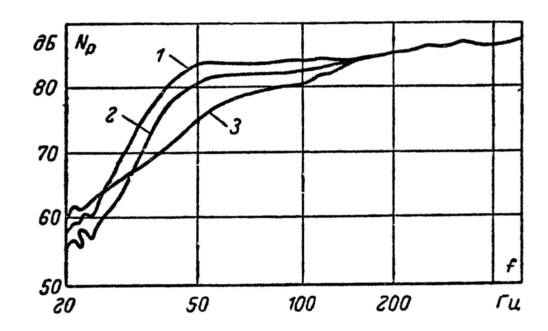


Рис. 64. Частотные характеристики головки громкоговорителя в различных типах акустического оформления в ящике неизменного объема.

1 — в фазоинверторе с прямоугольным отверстием; *2* — в фазоинверторе с пассивным излучателем; *3* — в закрытом ящике.

эффективным диаметром 165 мм в ящике объемом 80 л при различных вариантах акустического оформления. Эти характеристики показывают, что эффективность фазоинверторов обоих видов примерно одинакова и превосходит эффективность закрытого ящика. На рис. 65 показана оригинальная конструкция четырехполосного громкоговорителя фирмы Hitachi (Япония). Расположенные в закрытом ящике *4* высокочастотная головка *1*, среднечастотная *2* и низкочастотная *3* головки образуют трехполосную акустическую систему. Такая же низкочастотная головка *5*, укрепленная на горизонтальной панели *6*, непосредственно в окружающее пространство не излучает, а только возбуждает объем воздуха в фазоинверторе *7* на его резонансной частоте. Объем фазоинвертора, как видно из рисунка, больше объема ящика, в котором расположены головки *1*,

2 и *3*. Через отверстие фазоинвертора *8* излучаются звуковые колебания узкой полосы низших частот с минимальными искажениями благодаря свойствам фазоинвертора.

Акустический лабиринт. Некоторое распространение за рубежом получило оформление громкоговорителя, именуемое акустическим лабиринтом (за рубежом обычно его называют transmission line — линия передачи). Задняя сторона диффузора сообщается с окружающей средой через сложенную трубу прямоугольного сечения (вол-

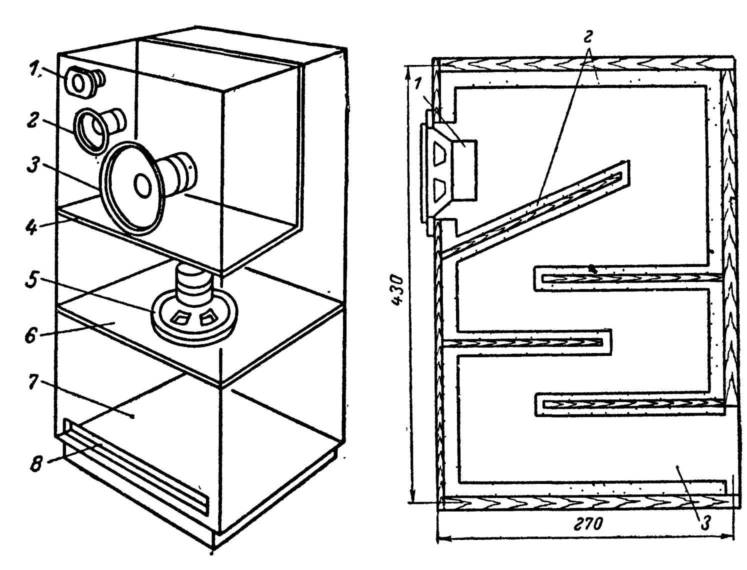
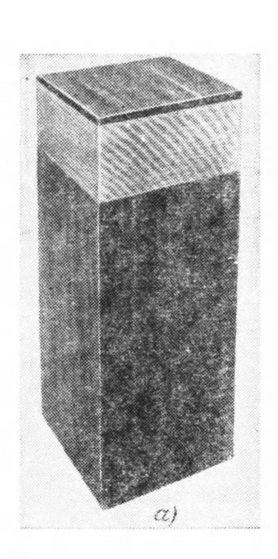


Рис. 65. Четырехполосный громкоговоритель с необычным использованием фазоинвертора.

Рис. 66. Лабиринт фирмы Akai в разрезе.

новод), площадь которого равна эффективной площади диффузора. Когда средняя длина трубы $l_{тр}$ равна $^1/_2$ длины волны излучаемой частоты, фазовый сдвиг равен 180° и излучение открытого конца (отверстия) трубы синфазно с излучением передней стороны диффузора. При длине волны, равной $^3/_4$ длины волны, соответствующей первой резонансной частоте $f_р$ или соответственно частоте $f_{ар}=229/l_{тр}$ и кратной ей, наступает антирезонанс трубы на этих частотах и звуковое давление уменьшается. Если частота основного резонанса головки, установленной в акустическом лабиринте, совпадает с частотой антирезонанса трубы, то нижняя граничная частота уменьшается в 1,33 раза. Однако для такого использования резонансных свойств трубы она должна иметь значительную длину; например, при первой резонансной частоте трубы, равной 60 Гц, ее длина должна составлять 2,8 м. Акустическое сопротивление трубы максимально, когда ее длина равна $\lambda/4$. Более длинные звуковые

волны отверстие трубы излучает не в фазе с диффузором головки, и отдача громкоговорителя резко падает. Поэтому длину трубы $l_{тр}$ обычно делают равной $^1/_4$ длины волны, соответствующей основной резонансной частоте головки $l_{тр} = \frac{86}{f_р}$. При этом благодаря большому акустическому сопротивлению трубы смещение звуковой катушки и нелинейные искажения уменьшаются.



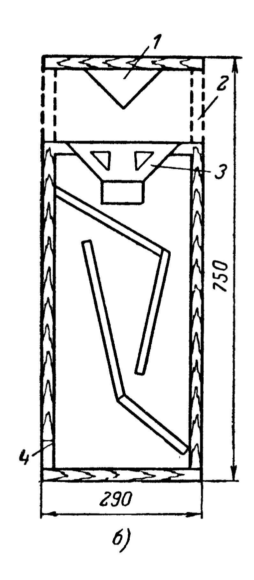


Рис. 67. Внешний вид (*а*) и разрез (*б*) радиального комнатного громкоговорителя с лабиринтом.

Для уменьшения влияния на частотную характеристику громкоговорителя частных (высших) резонансов трубы ее стенки должны быть покрыты звукопоглощающим материалом.

На рис. 66 показана в разрезе конструкция лабиринта типа SW-35, выпускаемого фирмой Akai (Япония). В нем применена одна широкополосная головка диаметром 130 мм. Ширина ящика 170 мм. Перегородки и внутренние поверхности ящика *3* имеют звукопоглощающее покрытие *2*. Так как доступ внутрь ящика затруднителен, головка *1* укреплена на внешней стороне лицевой панели ящика и покрыта редкой тканью (сеткой), укрепленной кольцом. (При самостоятельном изготовлении такого лабиринта кольцо можно сделать из металла, пластмассы или фанеры.)

На рис. 67, *а* показан общий вид, а на рис. 67, *б* — разрез комнатной конструкции радиального громкоговорителя с лабиринтом. Здесь над широкополосной головкой *3*, расположенной в горизонтальной плоскости, укреплен рассеиватель *1*. Звук излучается через сетку *2* и нижнее отверстие *4*.

Лабиринт можно сконструировать так, что он будет одновременно служить фазоинвертором. Для уменьшения нижней границы рабочего диапазона частот резонансную частоту фазоинвертора можно сделать в 2—3 раза ниже резонансной частоты трубы. На рис. 68 показана конструкция ящика такого трехполосного лабиринта. Его особенность — значительный объем (400 л) и наличие только одной внутренней перегородки *3*. Низкочастотную головку с частотой основного резонанса 41 Гц устанавливают внутри ящика напротив отверстия *1*. Отверстие фазоинвертора *2* имеет площадь 135 см^2. Расчетная резонансная частота трубы фазоинвертора 70 Гц, измеренная —80 Гц. Среднечастотная и высокочастотная головки устанавливают внутри ящика напротив отверстий *5* и *4* соответственно.

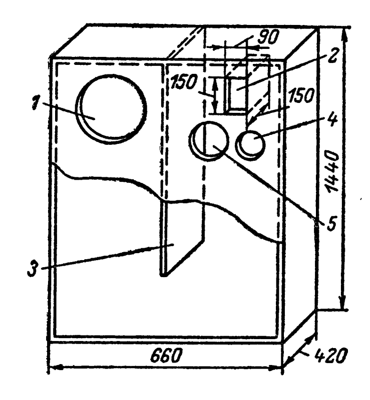


Рис. 68. Ящик трехполосного громкоговорителя с лабиринтом.

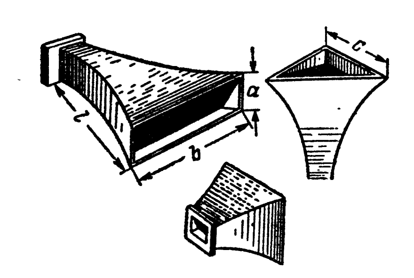


Рис. 69. Экспоненциальные рупоры различной формы.

В последнее время лабиринт стали заполнять звукопоглощающим материалом, который повысил эффективную длину трубы и сопротивление нагрузки диффузора головки. Правда, это снизило отдачу громкоговорителя на частотах выше 150 Гц, но зато позволило сделать в некоторых моделях лабиринта длину трубы, равную $^1/_8$ длины волны, соответствующей основной резонансной частоте головки, т. е. $l_{\text{тр}} = \frac{43}{f_{\text{р}}}$ (в метрах).

Рупор. Потребность в расчете и изготовлении рупора может возникнуть у радиолюбителя при конструировании высокочастотного громкоговорителя («пищалки») или электромегафона. Расчет и конструирование рупора упрощаются тем, что низшая граничная частота полосы пропускания $f_{\text{н}}$ такого громкоговорителя обычно выше 500 Гц. Для этих частот можно принять коэффициент расширения рупора $\beta > 0{,}2$, что позволяет укоротить рупор. Площадь поперечного сечения экспоненциального рупора изменяется по закону

$$S = S_0 e^{\beta x},$$

где S — площадь поперечного сечения рупора на расстоянии x от входного (узкого) отверстия; S_0 — площадь входного отверстия

(при $x=0$); коэффициент расширения рупора можно вычислить по формуле

$$\beta = 4\pi f_к / c = 4\pi / \lambda_к,$$

где $\lambda_к$ — длина волны, соответствующая критической частоте $f_к$; c — скорость звука.

Принято считать, что нижняя граничная частота полосы пропускания рупора $f_н = \sqrt{2}\, f_к$.

Зная площадь входного (узкого) отверстия рупора S_0, которую выбирают равной 1,5—5 см^2, задаются длиной рупора l, формой и размерами выходного отверстия a, b или c (рис. 69), которые определяют его площадь.

Приведем уже известное нам выражение $S = S_0 e^{\beta l}$ к виду $S/S_0 = e^{\beta l}$ и, прологарифмировав последнее, получим формулу для определения коэффициента расширения рупора:

$$\beta = \frac{2,3}{l} \lg \frac{S}{S_0}.$$

Площадь поперечного сечения рупора удваивается $(e^{\beta x} = 2)$, когда в выражении для определения этого размера показатель степени имеет значение $\beta x = 0,69$. После того, как коэффициент расширения установлен, нетрудно определить длины отрезков, через которые площадь поперечного сечения рупора будет удваиваться ($x = 69/\beta$). Сечение рупора в любом месте (при любом x) находят по приведенной выше основной формуле.

Расчет рупора можно провести, пользуясь рис. 70: в зависимости от требуемой низшей воспроизводимой частоты $f_н$ определяют по этому графику коэффициент расширения рупора β, после чего выбирают площадь входного отверстия S_0 и длину рупора l. Затем для этих данных определяют площадь выходного отверстия и в зависимости от желаемой формы отверстия рассчитывают размеры его сторон.

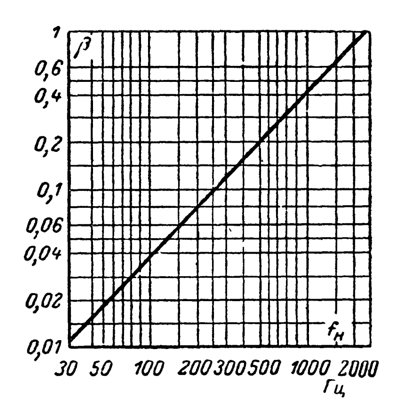


Рис. 70. Зависимость коэффициента расширения рупора β от низшей воспроизводимой частоты.

Экспоненциальность рупора может обеспечиваться кривизной (изгибом) всех его сторон либо части их; например, рупор может иметь две плоские стороны и две изогнутые. Рупор можно сделать из жести толщиной 0,3—0,5 мм, пропаяв края заготовок, или из пластмассы толщиной 1,2—1,5 мм, склеив края заготовок эпоксидной

смолой или соответствующим клеем. Рупор может быть и круглого сечения, но изготовить его в любительских условиях много сложнее.

При изготовлении рупора следует иметь в виду, что воздушный объем между диффузором (диафрагмой) головки и входным отверстием рупора, называемый предрупорной камерой, для лучшего воспроизведения звуков высших частот должен иметь наименьшую высоту. Это означает, что входное отверстие рупора должно находиться возможно ближе к диффузору, но так, чтобы последний не соприкасался с рупором. Улучшение воспроизведения звуков высших частот обеспечивается противоинтерференционным вкладышем.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ОФОРМЛЕНИЯ

Демпфирование панелей. Акустическое оформление громкоговорителя, помимо соответствия размеров и формы расчетным данным, должно быть изготовлено так, чтобы в нем не было щелей и чтобы оно не вибрировало при работе громкоговорителя. Вибрации отдельных элементов оформления (панелей, стенок ящиков), возникающие на их резонансных частотах, порождают призвуки, искажающие основной сигнал. Полностью необоснованными и, к счастью, почти неосуществимыми (из-за отсутствия материала) являются рекомендации делать ящики громкоговорителей из музыкальной ели, т. е древесины, идущей на изготовление деки некоторых музыкальных инструментов.

Хорошим материалом для изготовления акустического оформления служат фанера или древесно-стружечные плиты толщиной 12—20 мм. Эффективный способ уменьшения вибраций панелей акустического оформления, а следовательно, и нежелательного излучения заключается в установке низкочастотной головки на мягкой кольцевой прокладке (микропористая или губчатая резина, пенопласт ПХВЭ, резиновая трубка и т. п.); при этом уровень вибрации панелей снижается на 15—20 дБ.

При мягком креплении головки необходимо, чтобы крепящие болты не соприкасались непосредственно с диффузородержателем. Под их головки и гайки нужно подложить шайбы из того же мягкого материала. Наиболее трудно виброизолировать от панели тяжелую головку, например 8ГД-1РРЗ; такую головку рекомендуется крепить с помощью четырех скоб, две из которых прижимают к передней панели через упругие прокладки нижнее полукольцо диффузородержателя, а две другие — верхнее. К панели скобы прикрепляют болтами жестко, без прокладки. Под нижней кромкой диффузородержателя можно установить уголок длиной 40—50 мм, проложив между ним и диффузородержателем упругую прокладку; этот уголок примет на себя основную нагрузку головки и разгрузит пропущенные сквозь диффузородержатель болты.

Для уменьшения вибраций панелей увеличивают их жесткость применением дополнительных «ребер жесткости» (планок) или утолщением панелей; однако этот способ увеличения жесткости лишь повышает резонансные частоты панелей и меняет характер распределения их вибраций и излучения, так как изменяются число вибрирующих поверхностей и их размеры. Утолщение панелей (стенок ящика) кроме повышения резонансных частот увеличивает массу и повышает стоимость оформления. Поэтому для изготовления ящика целесообразно применять материалы с повышенными внутренни-

ми потерями колебательной энергии при их деформации (повышенным «внутренним трением»), обладающие вместе с тем достаточно высокой жесткостью. Такие материалы называют вибродемпфирующими или вибропоглощающими.

Вибропоглощающие материалы, которые можно нанести на обычные панели, превращают часть колебательной энергии вибраций в тепло и увеличивают механическое сопротивление панелей, чем уменьшают амплитуду вибраций. Особенно эффективно вибродемпфирование на резонансных частотах, когда возрастают амплитуды вибраций и деформации на изгиб или сдвиг.

Вибродемпфирующие свойства материала характеризуются логарифмическим декрементом затухания d и коэффициентом потерь $\eta = d/\pi$ (точнее, произведением декремента или коэффициента потерь на модуль упругости). Декремент затухания определяют по осциллографической записи затухающих колебаний пластины из испытуемого материала, которая возбуждается ударом или вибратором. Измерив значения двух амплитуд затухающего колебания, отстоящих на период, определяют декремент затухания по формуле

$$d = \ln \frac{A_1}{A_2},$$

где A_1 — начальная и A_2 — последующая измеренные амплитуды.

Если колебания испытываемой пластины затухают медленно, т. е. соседние амплитуды мало отличаются одна от другой, измеряют амплитуды, отстоящие на любое число периодов n, и вычисляют декремент затухания по формуле

$$d = \frac{1}{n} \ln \frac{A_1}{A_n},$$

где A_1 — начальная амплитуда; A_n — амплитуда колебания через n периодов.

Так, например, декремент затухания колебаний, изображенных на рис. 19, *а*, равен:

$$d = \frac{1}{4} \ln \frac{10,25}{1,25} = \frac{1}{4} 2,3 \lg 8,2 = 0,52.$$

Другим распространенным способом определения декремента затухания и коэффициента потерь является измерение интервала на резонансной кривой $\Delta f = f_2 - f_1$, где f_2 и f_1 — частоты выше и ниже резонансной частоты $f_р$, при которых амплитуды колебаний уменьшаются на 3 дБ по сравнению со значением, измеренным на частоте $f_р$. В этом случае декремент затухания

$$d = \pi \Delta f / f_р,$$

а коэффициент потерь

$$\eta = \Delta f / f_р.$$

Ориентировочно представление о декременте затухания панели можно получить по звонкости и длительности ее звучания, ударяя по панели, подвешенной за один угол, суставом пальца или куском дерева. Длительный звонкий звук свидетельствует о малом

декременте затухания, а короткий глухой звук указывает на значительные внутренние потери в материале.

Максимальное значение декремента затухания панелей толщиной 6 мм, изготовленных из сосны, равен 0,02, из бука —0,03 и из фанеры —0,04. Хорошим вибропоглощающим свойством обладают древесноволокнистые плиты толщиной 15—25 мм, имеющие декремент затухания около 0,08, и древесностружечные плиты, декремент затухания которых 0,06. Для сравнения укажем, что декремент затухания стали равен 0,001—0,00001, а алюминия в 3 раза больше.

Самым простым и дешевым средством увеличения декремента затухания панелей следует считать нанесение на них покрытия, обладающего повышенными внутренними потерями. Вибропоглощающим покрытием может служить рубероид — пропитанный битумом пористый картон. Он выпускается в рулонах длиной по 16 м при ширине 1 м. Толщина слоя рубероида 1,2—1,5 мм; декремент затухания равен 0,4, модуль упругости $25 \cdot 10^8$ Н/см^3. Рубероид наклеивают двумя-тремя слоями на пенель клеем № 88 или резиновым.

Хорошим вибропоглощающим покрытием является синтетический линолеум (пластик) без подложки из мешковины. Такой линолеум выпускается в рулонах и плитках толщиной 1,5—3,0 мм; его декремент затухания равен 0,7—0,9, модуль упругости $(15—30) \times \times 10^8$ Н/м^2, плотность 1,6—1,9. Линолеум можно наклеить специальным клеем для линолеума или клеем № 88.

Если между панелью и подобным вибропоглощающим покрытием поместить слой достаточно жесткого пористого материала (например слой пенопласта толщиной 6—12 мм), то увеличатся дедеформации (растяжение и сжатие) покрытия при вибрациях. В результате возросших изгибных деформаций вибропоглощающего материала увеличится обращаемая в тепло колебательная энергия вибраций, т. е. увеличится демпфирование. Применение промежуточного слоя позволяет уменьшить толщину вибропоглощающего покрытия приблизительно на 20% толщины прослойки без ухудшения его демпфирующих свойств.

Промежуточный слой может быть не сплошным, а иметь пропуски, составляющие 20—30% всей площади панели. Это позволяет, не ухудшая демпфирующие свойства вибропоглощающего покрытия, делать промежуточный слой из кусков материала. Для получения ровной поверхности и надежного склеивания с рубероидом или линолеумом куски промежуточного материала должны быть одинаковой толщины.

Очень хорошим вибропоглощающим покрытием может служить кровельный материал на битумной основе — фольгоизол, представляющий собой алюминиевую фольгу толщиной около 0,17 мм, на одну сторону которой нанесена изольная мастика толщиной около 2 мм, покрытая защитной полиэтиленовой пленкой или плотной бумагой; плотностью фольгоизола 1,2 г/см^3. Этот материал удобен по технологии его нанесения на демпфируемую поверхность. Фольгоизол приклеивают к панели поверхностью изола, после предварительного удаления с нее защитной пленки (бумага не может быть удалена). Проще всего приклеить фольгоизол, не имеющий бумаги, горячим способом: медленно проглаживают утюгом алюминиевую поверхность, изол при этом плавится и прилипает. Учитывая возможные неровности поверхности панели или фольгоизола, рекомендут до отвердевания изола прижать его в нескольких точках к па-

нели каким-нибудь грузом. Холодным способом фольгоизол приклеивают клеем № 88. При фольгоизоле без бумаги можно применить бензин. Наружный слой изоля при смачивании бензином растворяется. Затем фольгоизол прикладывают к панели и прижимают грузом в течение 1—2 сут. Если вибропоглощающее покрытие должно быть из двух или более слоев фольгоизола, то их наносят поочередно. При холодном способе эти слои могут быть заранее склеены в пакет и уже затем соединены с панелью.

Иногда полиэтиленовая защитная пленка у фольгоизола заменяется бумагой, образующей складки, не связанные с изолом. Для нанесения на панели такого фольгоизола следует вначале крупнозернистой шкуркой удалить бумажные складки и слегка зашкурить поверхность алюминия для лучшего склеивания. Склеивание слоев фольгоизола между собой и с демпфируемой панелью производится резиновым клеем № 88 или клеем БФ-2 (БФ-4). Клей наносят на склеиваемые поверхности дважды; первому слою клея дают высохнуть. Затем наносят второй слой клея, слегка подсушивают его и соединяют обе склеиваемые поверхности, плотно прижав их.

Вместо фольгоизола можно применить гидроизоляционный материал на той же основе — гидроизол толщиной около 2 мм; его плотность 1,24 г/см^3. Гидроизол можно применять только вместе со стальным или алюминиевым листом толщиной 0,2—0,3 мм, который должен быть снаружи. Технология нанесения на панель такого покрытия аналогична указанной для фольгоизола, однако, если учесть, что гидроизол необходимо соединять с двумя поверхностями, видимо, более удобен горячий способ.

Толщина вибропоглощающего покрытия определяется материалом и толщиной панели и ее желаемым коэффициентом потерь (декрементом затухания). Удовлетворительно демпфированная панель имеет коэффициент потерь $\eta = 0{,}05 \div 0{,}1$ (декремент затухания $d = 0{,}15 \div 0{,}31$). Как видно из рис. 71, для демпфирования панели из фанеры толщиной 8 мм вполне достаточно 2—3 слоев фольгоизола или 1—2 слоев гидроизола со стальным листом толщиной 0,2—0,3 мм. Меньшее число слоев гидроизола обусловлено большей жесткостью стального листа.

Представление об эффективности вибродемпфирования дают частотные характеристики коэффициента потерь панелей из стали и стекла при различном числе слоев фольгоизола (рис. 72): при 2—3 слоях фольгоизола колебательные потери панелей из этих материалов аналогичны потерям в 8-мм фанере, поэтому их с равным успехом можно использовать для изготовления акустического оформления громкоговорителей. Панели большей толщины потребуют увеличения толщины вибропоглощающего покрытия, т. е. числа слоев, при условии неизменного коэффициента потерь. Это обусловлено тем, что степень демпфирования вибраций и декремент затухания панели пропорциональны толщине вибропоглощающего покрытия, т. е. чем толще покрытие, тем больше демпфирование. Это справедливо до толщины покрытия, приблизительно равной двойной толщине панели.

Следует иметь в виду, что для одностороннего вибропоглощающего покрытия, работающего на изгиб, не пригодны резина, изол и войлок; имея удовлетворительный декремент затухания (0,3—0,6), они обладают невысоким модулем упругости — $3 \cdot 10^7 \div 20 \cdot 10^7$ Н/м. Однако из этих материалов можно сделать слоистые панели, обладающие хорошими вибропоглощающими свойствами. Их составляют

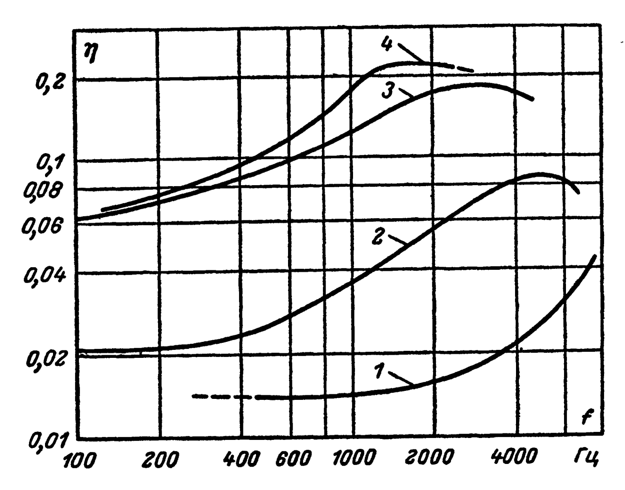


Рис. 71. Частотные характеристики коэффициента потерь фанеры толщиной 8 мм.

1 — без вибродемпфирующего покрытия; 2 — с одним слоем фольгоизола; 3 — с двумя слоями фольгоизола; 4 — с тремя слоями гидроизола.

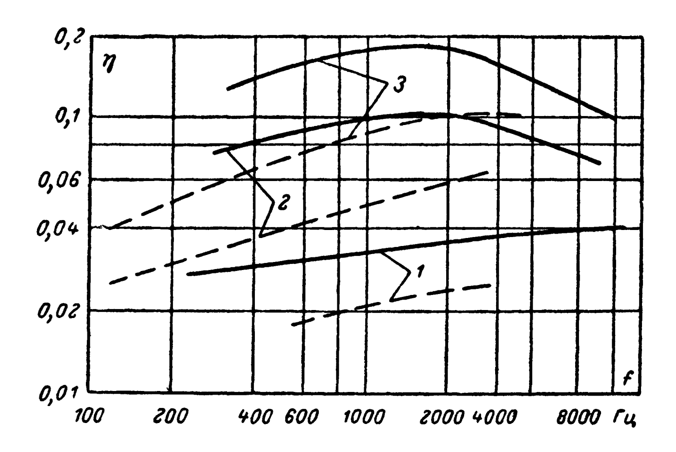


Рис. 72. Частотные характеристики коэффициента потерь покрытых фольгоизолом листов стали толщиной 2 мм (сплошные линии) и стекла толщиной 5 мм (штриховые линии). Цифры у кривых указывают числа слоев фольгоизола.

из двух слоев фанеры толщиной 3—6 мм, между которыми помещают слой резины, поролона, войлока или изола толщиной 2—4 мм. В такой конструкции материалы испытывают при вибрациях сдвиговые деформации, при которых внутренние потери получаются бо́льшими, чем когда они нанесены на одну сторону панели и испытывают изгибные деформации.

Сдвиговые деформации испытывает изол и в покрытиях с фольгоизолом. Слоистые покрытия лучше всего склеивать клеем № 88. Если же применяется войлок или поролон, вместо клея можно использовать нитрокраску, но ее следует наносить только на фанеру, так как вследствие пористости эти материалы интенсивно впитывают клей или его заменитель.

Наружные поверхности древесноволокнистых и древесностружечных плит можно оклеить шпоном ценной породы дерева или самоприклеивающейся пленкой, имитирующей поверхность дерева ценной породы.

Применение вибропоглощающего покрытия увеличивает общую жесткость панели, поэтому представляется возможным в 1,5—2 раза уменьшить ее толщину, не опасаясь увеличения вибраций.

Заметим, что вибропоглощающие покрытия могут быть полезными не только при конструировании ящиков громкоговорителей, но и во многих других случаях борьбы с вибрациями, например для ослабления вибраций панели проигрывателя с электродвигателем и звукоснимателем.

Звукопоглощающее покрытие, применяемое в акустическом оформлении, обязательно должно быть пористым. Механизм действия такого покрытия состоит в том, что звуковые волны, проникая в поры материала (капиллярные каналы), рассеивают (теряют) свою звуковую энергию благодаря вязкому трению в узких каналах и теплообмену между воздухом в порах и стенками этих пор. Чем толще покрытие и чем больше его коэффициент звукопоглощения, тем оно эффективнее. Коэффициент звукопоглощения представляет собой отношение поглощенной части энергии звука к падающей на поверхность материала энергии. Коэффициентом поглощения $\alpha = 1$ обладала бы совершенно неотражающая поверхность, но так как таких поверхностей не существует, за единицу поглощения принимают поглощение 1 м^2 открытого окна. Коэффициент поглощения большинства звукопоглощающих материалов значительно уменьшается на низших звуковых частотах. Для иллюстрации этой особенности приведены частотные характеристики коэффициента звукопоглощения α применяемых в строительстве теплоизоляционных материалов и поролона. Звукопоглощение пропорционально площади поверхности поглотителя; толщина поглотителя увеличивает звукопоглощение низших частот до 500—1000 Гц.

В качестве звукопоглощающего материала в акустическом оформлении громкоговорителя лучше всего применять волокнистые и пористые материалы: поролон, минеральную, стеклянную, капроновую или хлопчатобумажную вату, войлок и фильц, а также хлопчатобумажные очесы и другие подобные отходы. Толщина звукопоглощающего покрытия из войлока должна быть не менее 8—10 мм, а из ваты не менее 20—30 мм.

Чтобы нанести на внутренние поверхности ящика поглотитель из ваты, необходимо предварительно сделать из нее заготовки (маты). Для их изготовления берут куски картона или пластмассовой (винипласт) сетки, размеры которых должны соответствовать раз-

мерам внутренних поверхностей ящика, и раскладывают на них слой ваты желаемой толщины. Поверх слоя ваты кладут марлю, какую-нибудь другую неплотную (редкую) ткань или такую же сетку из пластмассы и полученный трехслойный пакет прошивают (простегивают) в нескольких местах суровой ниткой. Можно простегать вату между двумя слоями марли или еще лучше стеклоткани. Изготовленные таким способом пакеты укрепляют к панелям внутри ящика небольшими шурупами или гвоздями так, чтобы картон был обращен к стенкам, а вата внутрь ящика. При работе со стеклотканью, стеклянной или минеральной ватой следует надевать перчатки во избежание болезненных повреждений кожи.

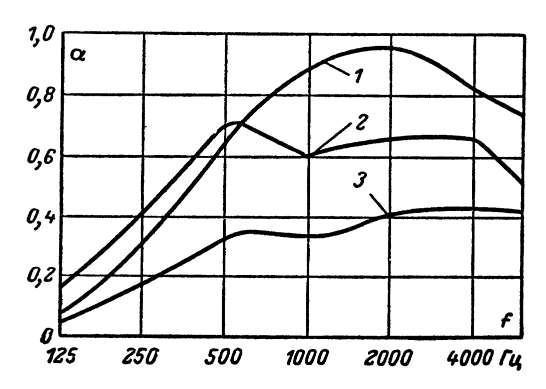


Рис. 73. Частотные характеристики коэффициента звукопоглощения различных материалов.

1 — минералватная плита ПП-80 толщина 30 мм; 2 — поролон толщиной 50 мм; 3 — древесноволокнистая плита толщиной 12 мм.

В последнее десятилетие наша промышленность стала выпускать новый пористый эластичный материал — пенополиуретан (поролон), который продается в виде ковриков, губок и т. п. Он обладает неплохим звукопоглощающим свойством. Пенополиуретановые коврики толщиной 20—50 мм удобно применять в качестве звукопоглощающего покрытия ящиков громкоговорителей. Для повышения звукопоглощающих свойств таких ковриков полезно в течение короткого времени походить по ним; после этого пористость ковриков увеличивается вследствие механического разрыва пленочек, открывающих дополнительные капилляры.

Звукопоглощающее покрытие наносят на всю внутреннюю поверхность закрытого ящика или фазоинвертора, за исключением панели с головками. Если материала недостаточно, то лучше им покрывать противоположную грамкоговорителю сторону ящика и части сторон, прилегающие к углам.

Древесноволокнистые плиты укрепляют в 1—2 слоя (в зависимости от их толщины) на внутренних поверхностях ящика или располагают на обеих боковых сторонах ящика перпендикулярно им в виде гребенки из 3—5 листов либо перпендикулярно дну или крышке ящика. Ширина гребенок должна составлять 0,25—0,4 ширины ящика, а расстояние между ними должно быть 100—150 мм.

В качестве простого и дешевого звукопоглотителя можно использовать литые древесноволокнистые формы для укладки яиц. Размер стороны такой формы около 310 мм, ее высота 50 мм, а толщина материала около 1,5 мм. Эти формы нужно сложить (одна в другую) по 5—8 шт. в пакет общей высотой около 80 мм и прикрепить его к внутренним поверхностям ящика. Если нет необходимого количества форм, то число их в пакете можно уменьшить до трех-четырех и проложить между ними вату или очесы.

Применяя звукопоглотитель, надо иметь в виду, что если укрепить его на стенках ящика не вплотную, а на расстоянии 20—50 мм от них, то звукопоглощение на частотах ниже 500 Гц увеличится.

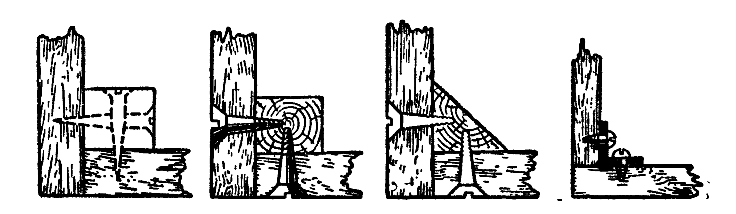


Рис. 74. Способы соединения стенок ящика.

Для самостоятельного изготовления ящика необходимо иметь навыки в столярном или слесарном деле. Не имея опыта, соединять панели на шипах трудно, а сделать чистое шиповое соединение панелей из древесноволокнистого материала и панелей, покрытых виброгоглощающим слоем, вообще невозможно. Подходящим для домашних условий способом надо считать соединение панелей при помощи деревянных брусков или металлических уголков (рис. 74). Последние рекомендуется предварительно приклеить к панелям клеем № 88, синтетическим клеем завода «Аэрозоль» или эпоксидной смолой, а деревянные бруски или уголки — поливинилацетатной эмульсией (ПВА), казеиновым, столярным или любым другим клеем, указанным выше для металлических уголков. Чтобы завинчивать шурупы было легче, рекомендуется предварительно просверлить для них отверстия сверлом, диаметр которого приблизительно вдвое меньше диаметра шурупа, смазать последние стеарином или мылом.

Наиболее трудной и ответственной является отделка внешних поверхностей ящика. Фанерование ценными породами дерева и последующая полировка поверхностей придают ящику привлекательный вид. К сожалению, такую отделку могут выполнить немногие, так как она требует, помимо соответствующих материалов, высокой квалификации. Поэтому, если имеется возможность, лучше использовать фанерованные древесноволокнистые плиты. Довольно приятный вид имеют древесностружечные плиты, покрытые лаком для паркетных полов. Проще всего покрыть внешние поверхности ящика самоприклеивающейся пленкой с рисунком дерева ценных пород.

Другой способ отделки ящика заключается в покрытии его поверхности декоративной тканью, которую натягивают на покрываемую поверхность и обрамляют декоративными рейками или багетом. На поверхностях, где нет громкоговорителей, вместо декора-

тивной ткани можно натянуть цветную полихлорвиниловую пленку или текстовинил подходящего цвета и рисунка. Можно также использовать любую тонкую ткань, цветную бумагу или подходящие обои, защитив их прозрачной полиэтиленовой пленкой.

В последнее время мебельные комбинаты стали выпускать тумбочку под телевизор с внутренними размерами 390×570×390 мм (объем 86 л) на четырех ножках. Ее можно использовать в качестве ящика громкоговорителя.

Акустическое оформление необходимо рассчитывать, исходя из параметров низкочастотных или широкополосных головок. Высокочастотные и среднечастотные головки могут быть помещены в общее акустическое оформление вместе с низкочастотными. Диаметр отверстия для головки должен быть равен полному диаметру диффузора, включая и гофры. Это исключит возможность соприкасания гофра со стенками отверстия. Если размер отверстия будет меньше диаметра диффузора, то в частотной характеристике звукового давления могут возникнуть дополнительные резонансные пики и провалы.

Если высокочастотная головка устанавливается в отверстии, сделанном в стенке толщиной более 12 мм, то воспроизведение звуков высших частот ухудшится, так как перед диффузором образуется объем воздуха, увеличивающий эффективную массу подвижной системы. В этом случае следует увеличить отверстие до диаметра диффузородержателя и прикрепить головку к наружной стороне панели с помощью дополнительного кольца из металла или пластмассы (см. рис. 42).

Диффузор громкоговорителя необходимо защитить от возможного внешнего механического повреждения, прикрыв отверстие (под декоративной тканью) металлической или пластмассовой сеткой со стороной ячейки 3—8 мм. Очень удобны для этой цели полиэтиленовые решетки с ячейками размером 22×25 мм, используемые в раковинах для мытья посуды, и сетки из винипласта, шириной около 500 мм. Если готовой сетки нет, ее можно сделать из капроновой лески толщиной 0,6—0,8 мм, которую натягивают без переплетения на гвоздях, прибитых вокруг отверстия в акустическом оформлении.

Облицовочные и декоративные элементы оказывают значительное влияние на частотную характеристику громкоговорителя. Плотная ткань ухудшает воспроизведение звуков и низших и высших частот. Рекомендуется проверить «на слух» отсутствие отрицательного влияния ткани.

Значительное влияние может оказать декоративный материал, закрывающий отверстия фазоинвертора, особенно проход, вследствие больших колебательных скоростей воздуха. Плотный и толстый материал недопустим; наиболее подходящим материалом является металлическая и пластмассовая сетка или перфорированный лист.

Толстые решетки и жалюзи могут иногда вызвать резонансные явления, и в частотной характеристике громкоговорителя появятся дополнительные пики и провалы. Среднечастотная и высокочастотная головки, не имеющие чехлов, при установке в общем оформлении с низкочастотной головкой должны быть сзади закрыты кожухом из фанеры, пластмассы или металла; можно подобрать соответствующую по размеру прямоугольную или круглую пластмассовую или металлическую коробку, например кастрюлю. Такой кожух устраняет воздействие на высокочастотную головку излучения

задней стороны диффузора низкочастотной головки. Свободное пространство внутри кожуха желательно заполнить ватой или другим пористым или волокнистым материалом так, чтобы он не соприкасался с диффузором. Кожух должен плотно прилегать к панели. Щели или отверстия в самом кожухе и между ним и панелью недопустимы. Можно использовать для заделки щелей пластилин или проложить между краями кожуха и панелью прокладки из губчатой резины или поролона. Все головки прямого излучения, устанавливаемые в ящике любой конструкции, рекомендуется обернуть одним-двумя слоями марли или разрезанным по длине капроновым чулком для защиты магнитного зазора от загрязнения пылью и особенно железными опилками.

ДВУХ- И ТРЕХПОЛОСНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Двух- и трехполосные громкоговорители дают возможность воспроизводить более широкую полосу частот с меньшими частотными и нелинейными искажениями по сравнению с громкоговорителями, использующими широкополосные головки. К этому надо добавить, что двух- и трехполосные системы улучшают акустические показатели звуковоспроизводящего звена более дешевым образом, так как широкополосная головка дороже узкополосных.

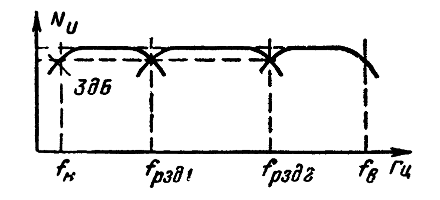


Рис. 75. Разделение полос воспроизводимых частот в трехполосной акустической системе.

Разделение полного диапазона частот на три частотные полосы показано на рис. 75. Здесь $f_н$ — нижняя, $f_в$ — верхняя граничные частоты воспроизводимой полосы, а $f_{рзд1}$, $f_{рзд2}$ — частоты раздела. Приведенные характеристики представляют собой уровни напряжения на выходе соответствующих разделительных фильтров. Трехполосная система является сложной и дорогой, но способна обеспечить воспроизведение широкой полосы частот с меньшей неравномерностью частотной характеристики. Однако двухполосные системы получили более широкое распространение.

Выбор числа полос производят на основе акустических параметров имеющихся головок и требований к неравномерности частотной характеристики системы. Частоты раздела выбирают, исходя из условий получения лучшей частотной характеристики громкоговорителя, т. е. меньших частотных искажений. Это определяется частотными характеристиками головок. Известно, что частотные искажения громкоговорителя минимальны до критической частоты диффузора $f_{кр}=5470/R_д$, выше которой он перестает колебаться. Некоторое влияние на выбор частоты раздела могут оказать запасы мощностей головок. Кривые требуемого соотношения мощностей головок, приведенные на рис. 41, показывают, что при повышении частоты раздела высокочастотная головка разгружается и увеличивается нагрузка низкочастотной головки.

Не рекомендуется выбирать частоту раздела в области наибольшей чувствительности нашего уха, т. е. в диапазоне 1—3 кГц, так

как при этом может возникнуть ощущение раздвоения источника звука. Наиболее подходящими частотами раздела могут быть частоты, лежащие в областях 400—800 Гц и 4—5 кГц. В простейшем двухполосном агрегате одну-две высокочастотные головки подключают через разделительный конденсатор к низкочастотному громкоговорителю.

Большинство головок прямого излучения мощностью 5—10 Вт (5ГД-3РРЗ, 6ГД-2, 6ГД-6, 8ГД-1РРЗ, 10ГД-30 и др.) хорошо работают в диапазоне низших и средних частот, т. е. воспроизводят довольно широкую полосу частот, имея частоту основного резонанса 30—60 Гц и снижение отдачи на высших частотах, начиная с 5—6 кГц. Таким образом, полоса частот, в которой эффективно могут

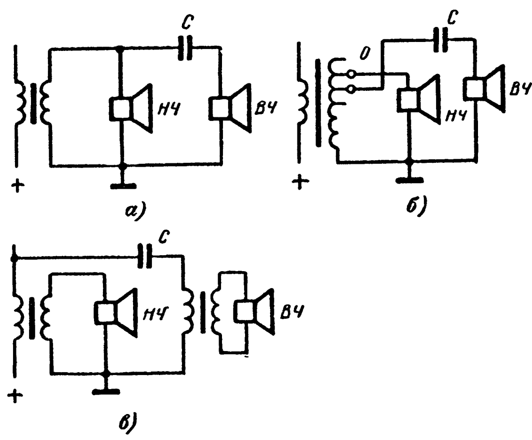


Рис. 76. Схемы подключения головок, воспроизводящих верхние частоты, к усилителям с выходными трансформаторами.

а — при приблизительно одинаковых значениях модуля полного сопротивления головок; *б* — при различных их значениях; *в* — то же с отдельным трансформатором для каждой головки.

работать эти головки, простирается от 30—60 Гц до 5 кГц. Для воспроизведения частот выше 5 кГц следует применять дополнительные небольшие головки, рассчитанные на воспроизведение полосы до частот 16—20 кГц, например 1ГД-3РРЗ, 3ГД-2, 3ГД-31.

На рис. 76 показаны возможные схемы подключения дополнительных высокочастотных головок к усилителям с выходными трансформаторами. Номинальные мощности головок при частоте раздела 5 кГц могут быть менее 0,1 номинальной мощности низкочастотного громкоговорителя. Присоединение дополнительных головок не нарушает согласования нагрузки с выходным каскадом и даже улучшает его, так как на высших частотах полное сопротивление основного громкоговорителя увеличивается, а нагрузка усилителя соответственно уменьшается.

Схему на рис. 76, *а* используют, когда модуль полного сопротивления высокочастотной головки приблизительно равен модулю полного сопротивления низкочастотной головки. В схемах на

рис. 76, *б*, *в* можно применять головки со значительно отличающимися модулями полного сопротивления. Согласование нагрузки в схеме на рис. 76, *б* достигается с помощью отводов во вторичной обмотке выходного трансформатора или применением отдельного трансформатора (рис. 76, *в*). Легче изготовить два хороших выходных трансформатора, работающих каждый в узкой полосе частот, чем один высококачественный широкополосный. Это особенно важно в мощном усилителе, где выходной трансформатор имеет большие габариты. Дело в том, что трансформатор, работающий в полосе нижних частот, должен иметь значительно бо́льшую индуктивность первичной обмотки, чем трансформатор, работающий в области верхних частот. Зато последний должен обладать очень малой индуктивностью рассеяния, которая увеличивается с ростом индуктивности первичной обмотки и габаритов трансформатора.

В схемах на рис. 76, *а* — *в* показано по одной головке в каждой полосе, в действительности можно подключить две головки и более. Конечно, все головки должны быть правильно сфазированы и необходимо учитывать при расчете модуль их общего полного сопротивления. Емкость разделительного конденсатора C определяется частотой раздела и модулем полного сопротивления высокочастотной головки $|Z_г|$. На частоте раздела $f_{рзд}$ емкостное сопротивление конденсатора должно быть равно модулю полного сопротивления головки, это обеспечивается, если его емкость в микрофарадах равна:

$$C = \frac{159 \cdot 10^3}{f_{рзд}\,|Z_г|}\,.$$

При этом на частоте раздела напряжение на высокочастотной головке будет в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем на низкочастотной.

Разделительный конденсатор, емкость которого рассчитана по этой формуле, дает затухание до частоты раздела 7 дБ на октаву.

Схемы простейших фильтров, при помощи которых к низкочастотной головке подводят напряжение только низших частот, а к высокочастотной головке только высших частот, приведены на рис. 77, *а*, *б*. Эти фильтры предназначены для головок с одинаковыми модулями полного сопротивления и имеют одинаковые входные сопротивления, равные модулю полного сопротивления одной головки, несмотря на то что в схеме на рис. 77, *а* головки соединены последовательно, а в схеме на рис. 77, *б* — параллельно. Емкость конденсатора и индуктивность катушки определяют из условия, что на частоте раздела их реактивные сопротивления должны быть равны полному сопротивлению головки, т. е.

$$2\pi f_{рзд} L = 1/(2\pi f_{рзд} C) = |Z_г|,$$

где L — в генри и C — в фарадах.

При этом каждая головка получит $1/2$ выходной мощности усилителя. Из последней формулы легко получаются расчетные формулы

$$L = \frac{159\,|Z_г|}{f_{рзд}}\,; \quad C = \frac{159 \cdot 10^3}{f_{рзд}\,|Z_г|}\,.$$

Здесь L, мГ; C, мкФ.

Формула для расчета емкости конденсатора идентична формуле для расчета емкости разделительного конденсатора высокочас-

тотной головки, что совершенно закономерно, так как обе они отвечают одинаковым условиям.

На рис. 78 приведен график, позволяющий определить значения емкости и индуктивности фильтра по заданному значению модуля полного сопротивления головки для двух частот раздела.

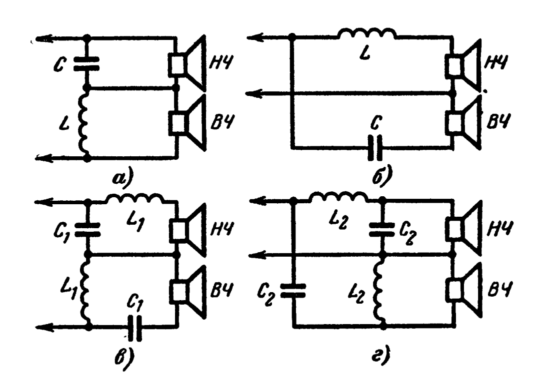


Рис. 77. Основные схемы разделительных фильтров.

Описанный фильтр имеет затухание от частоты раздела 6 дБ на октаву. Предпочтительнее, применение фильтров с более крутым срезом частотной характеристики затухания, так как при этом сокращается область частот, в которой одновременно излучают как низкочастотная, так и высокочастотная головки. Такие разделительные фильтры составляют из фильтров нижних частот и фильтров верхних частот, причем их входы по отношению к выходу усилителя могут быть соединены между собой либо последовательно (рис. 77, *в*), либо параллельно (рис. 77, *г*). Разделительные фильтры по обеим этим схемам имеют затухание около 12 дБ на октаву. Они также рассчитаны на головки с одинаковыми модулями полного сопротивления, а входное сопротивление фильтров равно модулю полного сопротивления одной головки; условие рас-

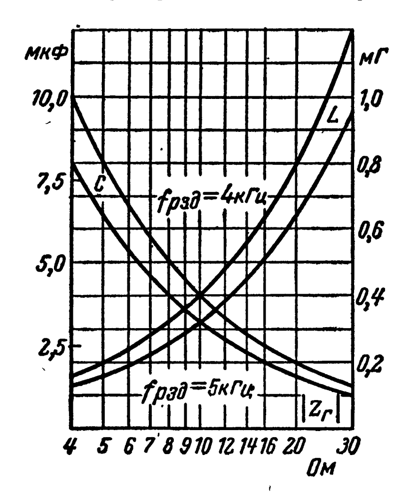


Рис. 78. График для расчета разделительной емкости C в схемах на рис. 76 и емкости C и индуктивности L в схемах на рис. 77, *а*, *б*.

чета этих фильтров такое же, как и у предыдущих: на частоте раздела подводимая мощность делится между головками поровну. Для схемы на рис. 77, *в* емкость и индуктивность определяют по формулам

$$C_1 = \frac{225 \cdot 10^3}{f_{рзд} |Z_г|}; \quad L_1 = \frac{113 |Z_г|}{f_{рзд}},$$

а для схемы на рис. 77, *г* — по формулам

$$C_2 = \frac{113 \cdot 10^3}{f_{рзд} |Z_г|}; \quad L_2 = \frac{225 |Z_г|}{f_{рзд}}.$$

Здесь также C_1 и C_2, мкФ; L_1, L_2, мГ.

До сих пор говорилось о фильтрах, рассчитанных на головки с одинаковым модулем полного сопротивления (в своих полосах частот).

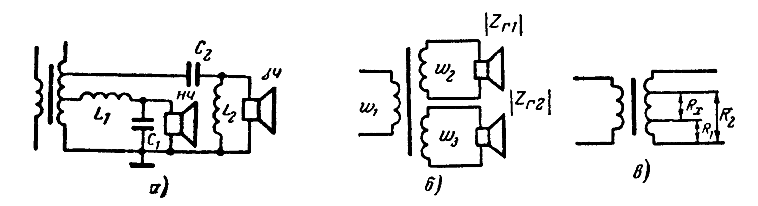


Рис. 79. Схема соединения головок с различными значениями модуля полного сопротивления через фильтры нижних и верхних частот (*а*) и схемы для расчета коэффициентов трансформации (*б*, *в*).

Если модули полного сопротивления головок различны, то их следует уравнять с помощью согласующего трансформатора (или автотрансформатора). Его лучше применить для высокочастотной группы и в зависимости от соотношения модулей сопротивления звуковых катушек использовать либо на повышение (если модуль сопротивления низкочастотной группы меньше), либо на понижение. Коэффициент трансформации

$$n = \sqrt{|Z_в|/|Z_н|},$$

где $|Z_н|$ и $|Z_в|$ — модули полных сопротивлений низкочастотной и высокочастотной головок на частоте раздела.

Если модули полных сопротивлений головок различны, причем $|Z_н| < |Z_в|$, то можно подключить головки к разным отводам вторичной обмотки выходного трансформатора так, как это показано на рис. 79, *а*.

При этом параметры фильтров нижних и верхних частот вычисляют по формулам:

$$L_1 = \frac{318 |Z_н|}{f_{рзд}}; \quad C_1 = \frac{318 \cdot 10^3}{f_{рзд} |Z_н|};$$

$$L_2 = \frac{79 |Z_в|}{f_{рзд}}; \quad C_2 = \frac{79 \cdot 10^3}{f_{рзд} |Z_н|}.$$

Коэффициент трансформации связан с модулями полного сопротивления головок и их номинальными мощностями соотношением

$$n = \frac{w_2}{w_1} = \sqrt{\frac{P_г\,|Z_г|}{P_{вых}\,z_н}},$$

где w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток; $P_{вых}$ — номинальная выходная мощность усилителя; $z_н$ — оптимальное сопротивление нагрузки усилителя; $P_г$ — номинальная мощность громкоговорителя; $|Z_г|$ — модуль полного сопротивления громкоговорителя (среднее значение).

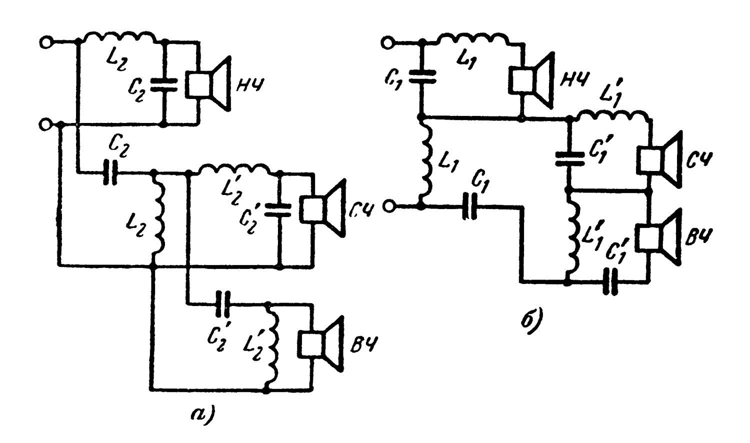


Рис. 80. Схема подключения фильтров к выходу усилителя при трехполосном громкоговорителе.

а — с параллельным соединением входов фильтров; *б* — то же с последовательным соединением.

Правильность расчета коэффициентов трансформации можно проверить по формуле

$$\frac{1}{\dfrac{n_1^2}{|Z_{г1}|} + \dfrac{n_2^2}{|Z_{г2}|} + \dfrac{n_3^2}{|Z_{г3}|}} = z_н.$$

Некоторые выходные трансформаторы заводского изготовления имеют отводы для включения нагрузок (громкоговорителей) с различными значениями сопротивлений (рис. 79, *в*). Определить значение сопротивления нагрузки, подключаемой к верхней секции и подобным же образом к остальным, можно по формуле

$$R_x = \left(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}\right)^2.$$

Перейдем к расчету трехполосных систем. Поскольку входные сопротивления фильтров, схемы которых приведены на рис. 77, *в*, *г*,

равны модулю полного сопротивления головки, это позволяет использовать такие же фильтры и в трехполосной системе при условии, что все три головки имеют одинаковые модули сопротивления в своих полосах частот.

Схема фильтра для трехполосной системы показана на рис. 80, *а*. Она содержит две пары фильтров с параллельным включением входов (соответствует схеме на рис. 77, *г*). Фильтры L_2C_2 рассчитывают по приведенным выше формулам для более низкой частоты раздела $f_{рзд1}$ и на выход одного из них (фильтра нижних частот) присоединяют низкочастотную головку. Вторую пару фильтров присоединяют к фильтру верхних частот первой ступени, пропускающему сигналы с частотами выше частоты раздела. Эти фильтры $L_2' C_2'$ рассчитывают по тем же формулам, что и первую пару, но для более высокой частоты раздела $f_{рзд2}$. Таким образом, вторая пара фильтров делит область частот, находящуюся выше первой частоты раздела $f_{рзд1}$, на две полосы с частотой раздела $f_{рзд2}$ между ними. Легко составить такую же систему из двух пар фильтров последовательного включения; ее элементы рассчитывают аналогичным образом, но по формулам, относящимся к схеме на рис. 77, *в*; такая схема показана на рис. 80, *б*. Она может представить интерес только тем, что в ней нужны другие значения емкостей конденсаторов и индуктивностей катушек, которые возможно будет легче купить или сделать.

Более простая схема включения головок в трехполосную систему показана на рис. 81, *а*. Частота раздела здесь ниже, а высокочастотная головка подключена к выходу фильтра верхних частот L_1C_1 через конденсатор C_3. Это устройство содержит только два фильтра и конденсатор вместо двух пар фильтров в схеме на рис. 80. Однако, строго говоря, эта схема все же является двухполосной, с добавочной высокочастотной головкой. В результате этого на высших частотах могут излучать как высокочастотная, так и среднечастотная головка, что увеличит неравномерность частотной характеристики в области высших частот. Поэтому более эффективным следует считать устойство с фильтрами, разделяющими весь диапазон на три полосы.

Существует еще одна разновидность трехполосной системы, когда к двухполосной системе подключают дополнительную головку через последовательный резонансный контур C_3L_3 (рис. 81, *б*). Эта головка может компенсировать провалы в частотной характеристике громкоговорителя двухполосной системы. Иногда небольшое увеличение отдачи в области средних частот (не более чем на 8—10 дБ), создаваемое дополнительной головкой, значительно улучшает качество звуковоспроизведения: лучше распознаются отдельные инструменты оркестра. Это особенно заметно при сравнении звучания с акустической системой, у которой снижена отдача на средних частотах, даже если такое снижение не выходит за пределы допусков.

Емкость конденсатора и индуктивность катушки контура C_3L_3, включенного последовательно с головкой, воспроизводящей средние частоты (рис. 81, *б*), рассчитать довольно просто. Резонансная частота такого контура

$$f_р = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3C_3}},$$

а его характеристическое сопротивление, которому в отдельности равны реактивные сопротивления конденсатора и катушки,

$$Z_c = \sqrt{L_3/C_3},$$

где f, Гц; Z, Ом; L_3, Г; C_3, Ф.

Полагая значение Z_c равным значению модуля полного сопротивления, которое имеет на частоте коррекции дополнительная головка, включенная через указанный контур, емкость конденсатора

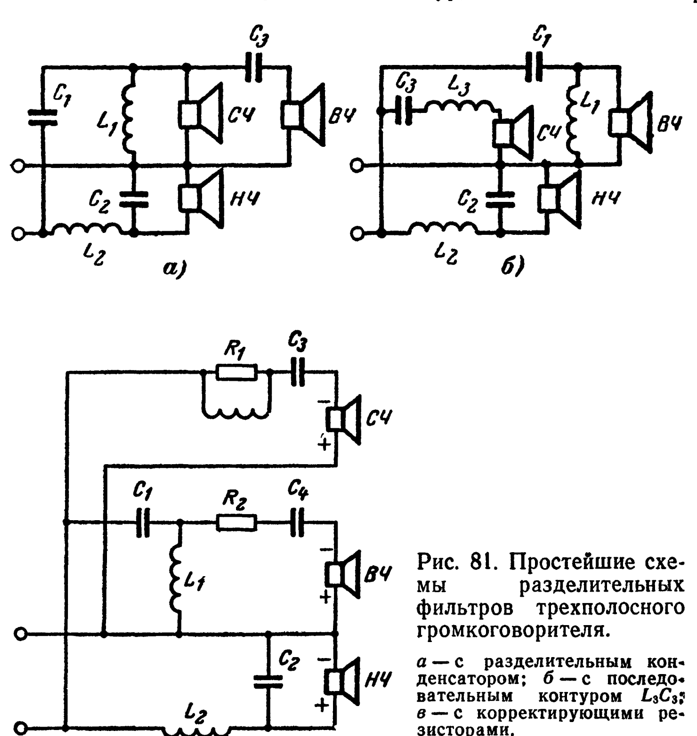


Рис. 81. Простейшие схемы разделительных фильтров трехполосного громкоговорителя.

а — с разделительным конденсатором; *б* — с последовательным контуром L_3C_3; *в* — с корректирующими резисторами.

в микрофарадах и индуктивность катушки в миллигенри можно вычислить по формулам:

$$L_3 = 159\,|Z_{г.доп}|/f_р; \quad C_3 = 159 \cdot 10^3/(|Z_{г.доп}|\,f_р).$$

Следует иметь в виду, что ширину полосы частот, в которой излучает дополнительная головка, можно расширить, уменьшив индуктивность L_3, как это следует из формулы

$$\Delta f/f = R_{г.доп}/(2\pi f L_3),$$

где $\Delta f = f_2 - f_1$, откуда

$$\Delta f = R_{г.доп}/(2\pi L_3).$$

Здесь Δf — ширина резонансной кривой на уровне 0,7 максимального значения, Гц; L_3 — индуктивность, Г; $R_{г.доп}$ — активное сопротивление головки, Ом.

Уменьшая индуктивность L_3 по сравнению с ее расчетным значением, нужно во столько же раз увеличить емкость C_3. Для дополнительной корректировки частотной характеристики катушку индуктивности фильтра среднечастотной головки шунтируют резистором и включают последовательно с разделительным конденсатором высокочастотной головки дополнительный резистор. На рис. 81, *в* приведена электрическая схема акустической системы, в которой применена такая коррекция.

В фильтрах этой схемы используют различные величины емкости конденсаторов и индуктивности катушек, что обусловлено различным сопротивлением звуковых катушек головок.

Метод коррекции частотной характеристики звукового давления громкоговорителя в сравнительно узкой полосе частот может быть использован и для улучшения воспроизведения низших частот. В этом случае дополнительную корректирующую головку используют главным образом в области ее основной резонансной частоты, на которую и рассчитывают последовательный контур, т. е. $f_р = f_г$. Если дополнительная головка аналогична основной, отличаясь от нее частотой основного резонанса не более чем на ± 10 Гц, то при установке ее рядом с основной уровень звукового давления увеличится на 3 дБ и улучшится согласование нагрузки с усилителем. Индуктивность катушки и емкость конденсатора фильтра рассчитывают по вышеприведенным формулам для контура L_3C_3. Однако, так как его резонансная частота соответствует частоте основного резонанса головки, индуктивность по расчету получится значительной. Рекомендуется уменьшить ее в 2—4 раза, увеличив во столько же раз емкость конденсатора.

Такой способ корректировки очень похож на описанный выше, в котором вместо электрического фильтра применялся фазоинвертор.

Следует упомянуть еще об одном получившем некоторое распространение способе разделения широкополосного сигнала на частотные полосы: для разделения полос используют RC-фильтры с отрицательной обратной связью, включая их между общим предварительным и двумя оконечными усилителями. Наличие двух мощных усилителей, работающих каждый в своей полосе, удорожает устройство. Положительная его сторона — более совершенное разделение полос с большой крутизной среза, достигающей 36 дБ на октаву.

Необходимо объяснить, почему на частоте раздела фильтры поровну распределяют мощность между головками, работающими в соседних полосах, т. е. снижают уровень напряжения на каждой головке на 3 дБ. Это значение выбрано потому, что сложение одинаковых звуковых уровней, создаваемых двумя источниками звука, повышает общий уровень на 3 дБ. Следовательно, снижение на частоте раздела напряжения на головках (и звукового давления) выравнивает общее звуковое давление, если, конечно, головки включены синфазно и отдача их на частоте раздела одинакова. Однако, к сожалению, создаваемые различными головками средние стандартные звуковые давления имеют различные значения.

В связи с этим рекомендуется средне- и высокочастотную головки присоединять к разделительным фильтрам через низкоомный

ступенчатый аттенюатор с 3—5 ступенями регулировки, как это показано на рис. 82. Важной особенностью примененного аттенюатора является постоянство его входного сопротивления. Оно может быть сделано равным модулю полного сопротивления головки, на которое рассчитан разделительный фильтр. Каждая ступень регулировки должна снижать уровень на 2 дБ, что соответствует уменьшению напряжения (и звукового давления) примерно до значения, равного

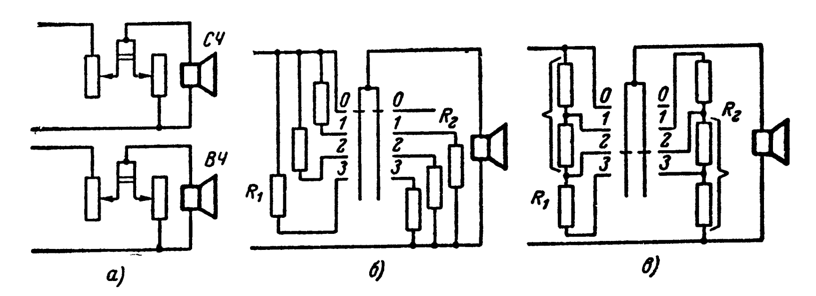


Рис. 82. Принципиальная схема включения аттенюатора (*а*) и ее практические варианты.

0,8 исходной величины. Сопротивление последовательного и параллельного резисторов находят по формулам:

$$R_1 = |Z_г| (1 - k); \quad R_2 = \frac{|Z_г| k}{1 - k},$$

где $|Z_г|$ — модуль полного сопротивления головки; k — коэффициент передачи ступеней аттенюатора.

Мы выбрали для первой ступени $k=0{,}8$. При определении сопротивлений резисторов для второй и следующих ступеней регулировки следует по номограмме на рис. 1 определить значение k, которое для второй ступени, вносящей общее затухание 4 дБ, будет $k=0{,}63$, для третьей (6 дБ) — $k=0{,}5$ и т. д.

Надо также иметь в виду, что сопротивления последовательного и параллельных резисторов могут создаваться либо отдельными резисторами, как это показано на рис. 82, *б*, либо с использованием резисторов предыдущей ступени (рис. 82, *в*). Во втором варианте необходимо, рассчитав сопротивления резисторов для данного затухания, вычесть из полученного расчетом значения сумму сопротивлений резисторов, включенных между нулевым контактом и предыдущим тому, для которого ведется расчет (расчет сопротивлений ведут, начиная с максимального затухания). Иначе говоря, вычитанием определяется значение сопротивления, которое надо добавить к уже рассчитанным, чтобы получить сопротивление, соответствующее данному затуханию. Для удобства определения сопротивления резисторов R_1 и R_2, в зависимости от модуля полного сопротивления головки, для разных затуханий при условии равенства входного сопротивления аттенюатора и модуля полного сопротивления головки на рис. 83 приведены расчетные графики.

Во всех приведенных выше схемах разделительных фильтров желательно применять бумажные конденсаторы, номинальное напряжение которых может иметь минимальное значение. Можно использовать и электролитические конденсаторы, но из-за отсутствия в цепи постоянной составляющей при трансформаторном выходе усилителя необходимо применить встречно последовательное включение таких конденсаторов. Такое включение конденсаторов использовано,

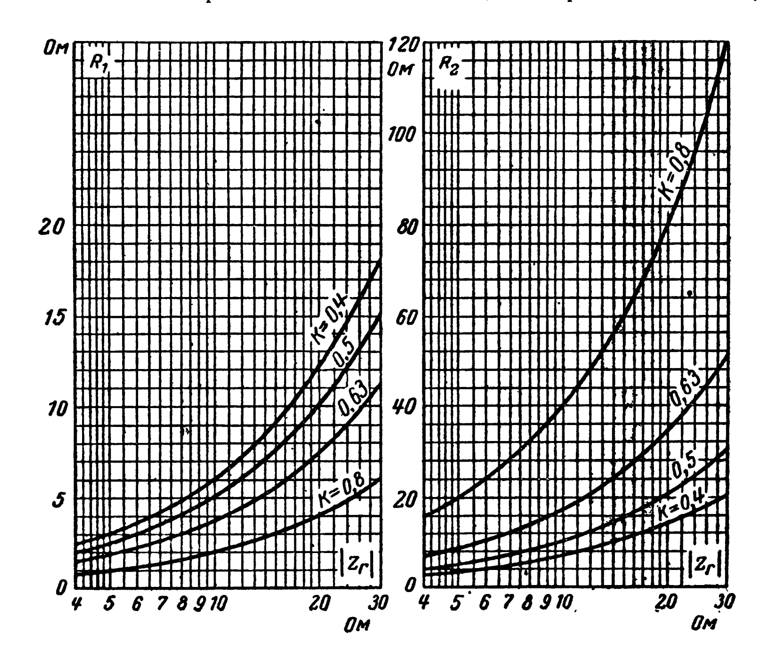


Рис. 83. Графики для расчета сопротивлений аттенюатора.

например, в радиоле «Симфония». Однако отечественная промышленность выпускает в достаточном ассортименте бумажные и металлобумажные конденсаторы сравнительно небольших размеров на номинальные напряжения 150—160 В с емкостью до нескольких десятков микрофарад (например, МБГО), которые легко разместить в ящике громкоговорителя.

Следует отметить, что в транзисторном оконечном двухтактном каскаде без выходного трансформатора разделительный электролитический конденсатор, через который подключают громкоговоритель (громкоговорители), находится под постоянным поляризующим напряжением. Поэтому и в разделительных фильтрах не требуется использование встречно-последовательного включения электролитических конденсаторов. Необходимо только строго соблюдать правильную полярность их включения.

Катушки разделительных фильтров не должны иметь магнитопроводов, так как всегда имеется опасность появления дополнитель-

ных нелинейных искажений вследствие нелинейности кривой намагничивания стали.

Для уменьшения потерь энергии включаемые последовательно с громкоговорителями катушки наматывают проводом достаточно большого сечения в эмалевой или хлопчатобумажной изоляции. Активное сопротивление обмотки должно быть в 10—20 раз меньше общего сопротивления головок, работающих в данной полосе частот. Индуктивность многослойной катушки, имеющей размеры согласно рис. 84, можно вычислить по формуле

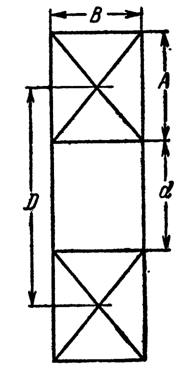


Рис. 84. К расчету катушки разделительного фильтра.

$$L = \frac{80D^2w^2 \cdot 10^{-6}}{3D + 9B + 10A},$$

где w — число витков; D — средний диаметр катушки, мм; B — ширина намотки, мм; A — высота намотки, мм.

Если $d = A = 1{,}2\,B$ и $D = 2A = 2{,}4\,B$, то индуктивность такой катушки в миллигенри определяют по формуле

$$L = 16{,}4Bw^2 \cdot 10^{-5}.$$

Расчет ведется следующим образом: задаемся сопротивлением обмотки $r_{об} = 0{,}05$—$0{,}1\,R_г$ и шириной катушки B. Площадь сечения обмотки принятой конфигурации будет $S_{об} = AB = 1{,}2\,B^2$, а объем обмотки $V_{об} = S_{об}\pi D = 9\,B^3$. С помощью табл. 3 определяем число витков и сопротивление обмотки для $S_{об}$ и $V_{об}$ и какого-либо выбранного диаметра провода и сопоставляем сопротивление с требуемым, а по укладывающемуся числу витков обмотки подсчитываем индуктивность.

Таблица 3

Диаметр провода по меди, мм	Число плотно намотанных витков на 1 см² сечения обмотки	Сопротивление кубического сантиметра непрерывной намотки, Ом	
		проводом ПЭ	проводом ПБО
0,4	446	0,668	0,462
0,5	292	0,280	0,210
0,6	206	0,137	0,1085
0,7	155	0,076	0,062
0,8	118	0,0444	0,0383
0,9	95	0,0284	0,0247
1,0	78	0,0189	0,0167
1,1	65	0,0130	0,0118
1,2	55	0,00924	0,00845
1,3	47	0,00678	0,00625
1,4	44,5	0,00516	0,00475
1,5	39	0,00394	0,00364

Если полученные расчетом значения индуктивности и сопротивления катушки меньше требуемых, расчет повторяют для провода меньшего диаметра. Если сопротивление обмотки увеличивать нельзя, то, сохраняя прежний диаметр провода, увеличивают размер B и тем самым возможное число витков. Обычно катушки делают бескаркасными; обмотку наматывают на болванке со съемными щечками, которые по окончании намотки удаляют. Обмотку для прочности стягивают тесьмой или ниткой в 4—5 местах по окружности.

Пример 1. Рассчитать катушку индуктивностью $L=30$ мГ с сопротивлением обмотки 2,5—3,5 Ом при ширине обмотки $B=30$ мм. Площадь сечения обмотки равна $S_{об}=1{,}2\ B^2=10{,}8$ см^2; объем обмотки $V_{об}=9\ B^3=243$ см^3. С помощью табл. 3 находим, что при использовании провода ПЭ диаметром 1 мм обмотка будет иметь сопротивление 4,6 Ом и количество витков 840. Индуктивность катушки будет равна: $L=16{,}4\ B\ w^2\cdot10^{-5}=16{,}4\cdot30\cdot840^2\cdot10^{-5}=35$ мГ.

Так как сопротивление получилось завышенным, а значение индуктивности близко к требуемому, увеличим немного размеры катушки (примем $B=34$ мм), а также диаметр провода (примем 1,2 мм). Новая площадь сечения обмотки и ее объем равны: $S_{об}=13{,}9$ см^2; $V_{об}=352$ см^3. По таблице находим, что обмотка будет иметь 765 витков и сопротивление 3,25 Ом; ее индуктивность $L=32$ мГ. Катушка с такими параметрами удовлетворяет заданию.

Пример 2. Рассчитать катушку с индуктивностью 4 мГ, сопротивлением 0,8 Ом и шириной обмотки $B=2{,}5$ см. Площадь сечения обмотки $S_{об}=7{,}5$ см^2 и ее объем $V_{об}=140{,}5$ см^3. С помощью табл. 3 находим, что обмотка, выполненная проводом ПЭ диаметром 1,3 мм, будет иметь 352 витка, ее индуктивность 5,07 мГ и сопротивление 0,952 Ом. Индуктивность и сопротивление оказались больше заданных. Поэтому перерасчитываем обмотку на провод диаметром 1,4 мм. При этом число витков обмотки будет 334, индуктивность 4,55 мГ, сопротивление 0,726 Ом. Поскольку сопротивление оказалось меньше заданного, дальнейшее увеличение диаметра провода нецелесообразно. Попробуем немного уменьшить ширину обмотки, приняв $B=2{,}4$ см; при этом $S_{об}=6{,}9$ см^2, $V_{об}=124$ см^3. Обмотка из провода ПЭ диаметром 1,3 мм будет иметь 325 витков, ее индуктивность 4,15 мГ, сопротивление 0,84 Ом, т. е. параметры ее хорошо удовлетворяют заданию.

Индуктивность изготовленной катушки, так же как и емкость конденсаторов, предназначенных для фильтра, желательно измерить. При отсутствии измерительного прибора можно с достаточной точностью определить индуктивность и емкость по их реактивным сопротивлениям, измеренным на переменном токе частотой 50 Гц. Так как реактивное сопротивление катушки на частоте 50 Гц может быть соизмеримо с ее активным сопротивлением, то, измерив модуль z_L и активное сопротивление обмотки r_L, индуктивность катушки в миллигенри можно вычислить по формуле

$$L=3{,}18\sqrt{z_L^2-r_L^2}\,.$$

Емкость конденсатора в микрофарадах

$$C=318/X_C\,,$$

где X_C — измеренное значение реактивного сопротивления, Ом.

Модуль полного сопротивления катушки или емкостное сопротивление конденсатора можно определить по закону Ома, измерив силу переменного тока, протекающего через них, при известном значении напряжения (от понижающего трансформатора). Можно их измерить методом замещения резистором равного сопротивления, так же как измеряют модуль полного сопротивления громкоговорителя (стр. 135). Приводим значения реактивных сопротивлений катушек индуктивностей и конденсаторов, с которыми приходится иметь дело при изготовлении разделительных фильтров при частоте 50 Гц.

Индуктивность, мГ	Реактивное сопротивление, Ом
1	0,31
2	0,63
3	0,94
5	1,57
10	3,14

Емкость, мкФ	Реактивное сопротивление, Ом
5	628
10	314
20	157
30	104,7
40	78,5

Прямое отношение к изложенному в этом параграфе имеет следующее, немаловажное для высококачественного звуковоспроизведения обстоятельство. Как известно, излучаемая головкой мощность резко уменьшается на частотах ниже основной резонансной частоты головки (спад уровня от 12 до 18 дБ на октаву в зависимости от вида акустического оформления) и одновременно возрастают нелинейные искажения.

Рекомендуется выбрать низшую границу воспроизводимого акустической системой без искажений диапазона частот в соответствии с самой низкой частотой спектра подводимого к громкоговорителю сигнала. Если самая низкая частота сигнала будет ниже граничной частоты акустической системы, то, применив соответствующий фильтр в предварительном усилителе, следует уравнять эти граничные частоты.

Правильность изготовленных разделительных фильтров проверяют измерением их частотных характеристик по напряжению. Рекомендуется сначала измерить характеристику, включив на выход фильтра вместо головок резистор с сопротивлением, равным расчетному значению модуля полного сопротивления головки. Убедившись, что частотная характеристика соответствует ожидаемой по расчету, заменяют резистор головкой и повторяют измерение. Схема измерений приведена на рис. 85.

Полученные частотные характеристики могут различаться между собой из-за того, что сопротивление звуковых катушек имеет индуктивную составляющую, изменяющую с ростом частоты нагрузку фильтров. В результате этого может переместиться и частота раздела. На рис. 86 в качестве примера представлены частотные характеристики фильтров при их нагрузке на активные сопротивления резисторов (пунктирная линия) и на сопротивление головок (сплош-

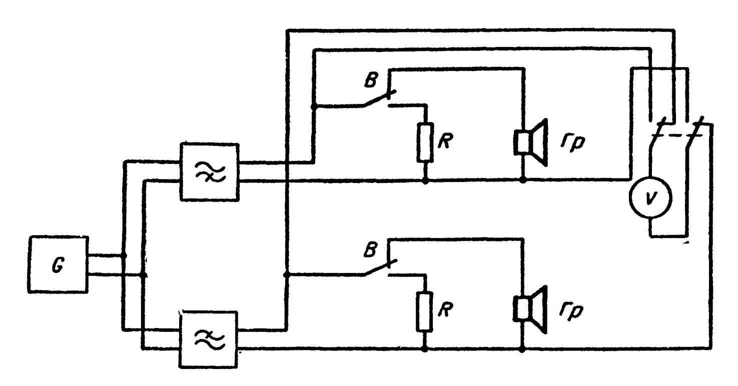


Рис. 85. Функциональная схема устройства для измерения частотных характеристик разделительных фильтров.

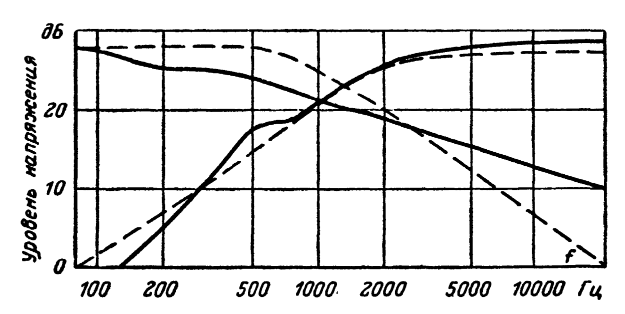


Рис. 86. Пример частотных характеристик разделительных фильтров, нагруженных резисторами (штриховые линии) и головками громкоговорителей.

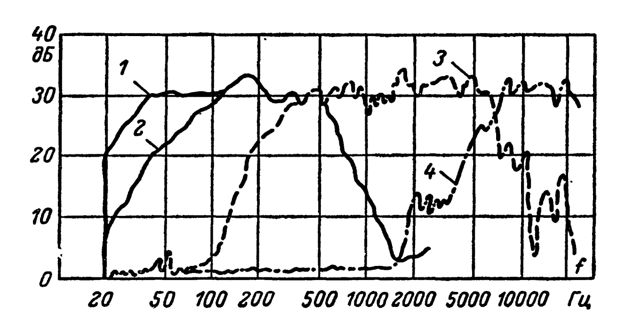


Рис. 87. Частотные характеристики уровня звукового давления головок трехполосного громкоговорителя.

1 — низкочастотной головки в открытом пространстве; *2* — низкочастотной в камере; *3* — среднечастотной; *4* — высокочастотной.

ная линия). Видно, что характеристика фильтра нижних частот с головкой становится более пологой, а частота раздела уменьшается. Если имеется возможность, то для окончательной проверки измеряют частотные характеристики по звуковому давлению на открытом воздухе или в заглушенной камере. Микрофон при этом располагают на расстоянии 1 м от акустической системы. В результате получают частотные характеристики, подобные представленным на рис. 87. Эти характеристики относятся к хорошо откорректированной трехполосной акустической системе, электрическая схема которой приведена на рис. 81, *в*.

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА НЕСКОЛЬКИХ ГОЛОВОК И ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Иногда с целью повышения уровня интенсивности звука к имеющемуся громкоговорителю добавляют еще один. Представляет интерес выяснить, как при этом увеличится уровень звукового давления в помещении.

Пусть интенсивность звука, создаваемая на некотором расстоянии первым громкоговорителем, равна I_1, а интенсивность, создаваемая на таком же расстоянии вторым громкоговорителем, равна I_2. Отношение этих интенсивностей $n = I_2/I_1$.

Изменение уровня интенсивности звука в децибелах по сравнению с исходным уровнем, создаваемым одним громкоговорителем,

$$\Delta N_I = 10\lg\frac{I_1 + I_2}{I_1} = 10\lg(1 + n).$$

Следовательно, если добавляется второй громкоговоритель с одинаковой интенсивностью звука, т. е. $n=1$, то увеличение уровня $\Delta N_I = 10\lg(1+1) = 3$ дБ.

На рис. 88 приведен график для определения увеличения общего уровня интенсивности звука N_1, обусловленного добавлением второго громкоговорителя, в зависимости от соотношения уровней интенсивностей звука, создаваемых каждым из громкоговорителей (N_2—N_1). Из этого графика видно, что не имеет смысла добавлять второй громкоговоритель, если его интенсивность звука меньше интенсивности звука первого на 3 дБ ($n=0{,}5$).

С целью выравнивания частотной характеристики звукового давления и повышения отдачи громкоговорителя на низших частотах часто применяют дополнительную головку в общем акустическом оформлении с однотипной основной.

Общая частотная характеристика системы выравнивается потому, что частотные характеристики разных экземпляров головок даже одного и того же типа неодинаковы. Подъем (пики) и провалы чувствительности оказываются несколько сдвинутыми по частоте и потому частично взаимно компенсируются. Отдача увеличивается потому, что благодаря взаимному влиянию рядом расположенных и синфазно работающих головок увеличивается сопротивление излучения каждой из них. Это видно из рис. 89, на котором показано увеличение сопротивления излучения одной головки в зависимости от отношения диаметра ее диффузора к длине излучаемой звуковой волны, т. е. $D_д/\lambda = D_д f/c$ для одной, двух и трех дополнительных однотипных головок. Приведенные кривые показывают, что

сопротивление излучения возрастает только в области низших и части средних частот, на которых головки являются полностью синфазными ненаправленными излучателями. Это примерно соответствует отношению $D_д/\lambda = 0{,}2 \div 0{,}3$; для диффузора с эффективным диаметром 240 мм предельная частота находится в пределах 286—430 Гц, причем если на частоте 430 Гц сопротивление излучения увеличивается при двух головках в 1,4 раза, то на частотах 50 Гц и ниже — почти вдвое.

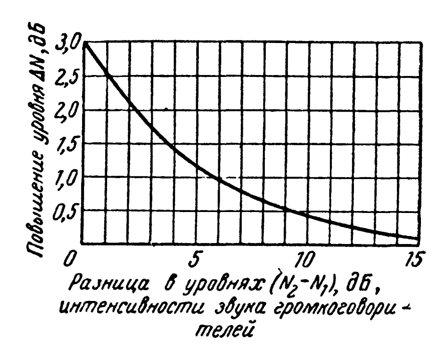


Рис. 88. Зависимость общего уровня интенсивности звука от разницы в уровнях, создаваемых основным и добавочным громкоговорителями.

Удвоение отдачи двух головок возникает благодаря эффекту их взаимодействия (возрастанию сопротивления излучения), так как две головки увеличивают звуковое давление в 4 раза, в то время как потребляемая от усилителя мощность лишь немного больше удвоенной. В результате увеличения сопротивления излучения увеличивается и присоединенная масса, соколеблющаяся с диффузорами, и благодаря этому снижается основная резонансная частота головок. На рис. 90 приведены частотные характеристики модуля полного сопротивления одной и четырех (штриховая линия) однотипных головок в экране, соединенных попарно последовательно и параллельно. Эти характеристики показывают, что основная резонансная частота четырех головок, соответствующая максимальному значению модуля их полного сопротивления, снизилась с 35 до 27 Гц.

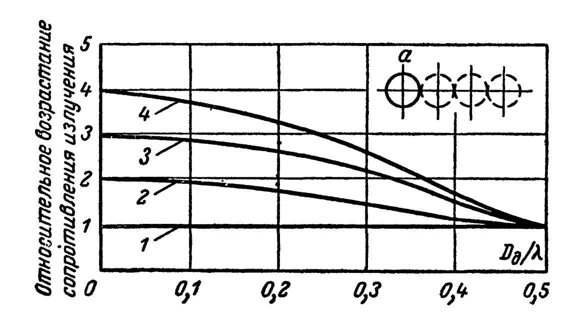


Рис. 89. Зависимость сопротивления излучения от числа расположенных рядом синфазных излучателей и отношения их диаметра к длине излучаемой волны.

Цифры около кривых соответствуют числам излучателей.

Синфазное включение головок может быть достигнуто последовательным или параллельным соединением их звуковых катушек. Выше мы говорили, что для электрического демпфирования головок предпочтительнее параллельное их соединение, но способ их соединения не оказывает влияния на частотную характеристику, если усилитель имеет низкое выходное сопротивление.

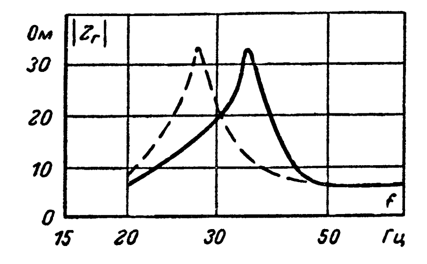


Рис. 90. Частотные характеристики модуля полного сопротивления одной (сплошная линия) и четырех (штриховая линия) однотипных головок в экране.

Вопрос о параллельном или последовательном соединении звуковых катушек головок часто решается только из соображений удобства согласования их с усилителем и разделительными фильтрами, особенно когда головки акустически демпфированы и надобности в электрическом демпфировании практически нет.

Когда выходное сопротивление усилителя недостаточно мало (это может быть в переносной и малогабаритной аппаратуре), тогда способ соединения головок может оказать некоторое влияние на частотную характеристику громкоговорителя в области частоты основного резонанса. Дело в том, что если головки имеют различные частоты основного резонанса (f_{p1} и f_{p2}), отличающиеся на 20—30 Гц, то при параллельном их соединении благодаря взаимной связи цепей система будет иметь одну резонансную частоту $f_p = 0{,}7\sqrt{f_{p1}^2 + f_{p2}^2}$.

При последовательном соединении этого не происходит, и разнесение резонансных частот способствует расширению области низших частот, в которой отдача увеличивается.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ОЗВУЧИВАНИЯ

Для озвучивания помещений и открытых пространств используют сосредоточенную (централизованную) или распределенную (децентрализованную) систему громкоговорителей. В первой системе один или несколько громкоговорителей расположены в одной точке пространства. Сущность распределенной системы заключается в том, что озвучивание осуществляется многими громкоговорителями, расположенными по всему помещению или пространству. Звуковое поле сосредоточенной системы обладает большой неравномерностью, так как громкоговоритель или группа громкоговорителей, рассчитанные на создание в самой удаленной точке минимально удовлетворительного уровня звукового давления, будут вблизи создавать чрез-

мерно высокий уровень[1], неприятный для прослушивания. При осуществлении звукоусиления высокий звуковой уровень вблизи громкоговорителей сосредоточенной системы создает опасность возникновения акустической обратной связи.

Распределенная система громкоговорителей обеспечивает наибольшую равномерность звукового поля, вследствие чего качество звуковоспроизведения в помещении значительно меньше зависит от его акустических свойств, чем при сосредоточенной системе. Это очень важно для помещений, обладающих плохой акустикой (большие, гулкие или низкие, длинные). Распределенная система характеризуется отсутствием возможности локализации отдельных источников звука и ощущением звучания всего пространства. Состоит такая система из цепочки громкоговорителей малой мощности, укрепленных на боковых стенах помещения на расстоянии 2—3 м друг от друга и на высоте 2,5—4 м. Звуковое поле становится практически равномерным уже на расстоянии от цепочки, большем, чем половина шага цепочки (расстояния между ближайшими громкоговорителями).

На открытом пространстве шаг цепочки выбирают равным 20—35 м при высоте подвеса громкоговорителей 5—10 м; они должны иметь малую направленность излучения в горизонтальной плоскости. Этому условию удовлетворяют радиальные громкоговорители 10ГДН-1 и ДГР-25. Снижение звукового уровня вблизи громкоговорителей в распределенной системе делает менее вероятным возникновение акустической обратной связи при звукоусилении. Примером успешной реализации распределенной системы громкоговорителей является территория ВДНХ СССР в Москве, где радиальные громкоговорители ДГР-25 установлены вдоль аллей с интервалами 25 и 35 м на высоте 8 м.

ФАЗИРОВКА ГОЛОВОК В ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯХ

Выводы звуковых катушек двух или большего числа совместно работающих головок обязательно должны быть соединены так, чтобы звуковые волны излучались ими в одинаковой фазе. Если выводы имеют обозначения полярности (как это предусмотрено ГОСТ 8010-73 на головки прямого излучения), то, руководствуясь этими обозначениями, осуществить правильное соединение не представляет затруднений. Если же обозначений полярности на головках нет, приходится осуществлять фазировку визуально или на ощупь пальцем, подключая к выводам звуковой катушки батарею (элемент) напряжением 1,5—4,5 В. Изменяя полярность батареи, добиваются того, чтобы при ее включении (или отключении) все диффузоры смещались в одну сторону. Затем, отметив полярность включения выводов звуковых катушек, соответственно соединяют их одноименными полюсами при параллельном соединении и разноименными — при последовательном.

[1] В открытом пространстве интенсивность звука изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника звука. Поэтому при увеличении расстояния вдвое уровень интенсивности уменьшается на 6 дБ. В помещении, особенно большом, это соотношение сохраняется только на некотором расстоянии от громкоговорителя (в так называемом прямом звуковом поле), а далее интенсивность звука вследствие отражений от границ помещения (реверберации) мало изменяется.

Удобнее, особенно при малогабаритных высокочастотных головках, осуществлять фазировку с помощью магнитоэлектрического миллиамперметра с током полного отклонения 5—10 мА, имеющего нулевую отметку в середине шкалы; подключив его к звуковой катушке, легко и плавно нажимают пальцами на диффузор и замечают, в какую сторону отклоняется стрелка миллиамперметра. Переключая концы звуковой катушки одной из головок, добиваются отклонения стрелки в одну сторону для каждой головки и отмечают полярность на выводах головки в соответствии с полярностью миллиамперметра.

Правильность фазировки можно проверить и на слух, переключая выводы звуковой катушки одной из головок во время прослушивания какой-либо передачи. При неправильном включении громкость на низших частотах заметно уменьшается. Последний способ пригоден только при сдваивании головок. При большем их количестве фазировка на слух становится трудной.

При проверке фазировки на слух переключение концов следует осуществлять очень быстро. Это дает возможность сравнивать громкости звучания практически без участия звуковой памяти. При проведении таких экспериментов в сравнительной оценки звучания разных головок громкоговорителей удобно пользоваться переключателем (тумблером). Когда необходимо проверить фазировку громкоговорителей, к низкочастотным головкам которых доступ затруднен, это можно просто сделать, поставив два громкоговорителя (диффузорами) друг против друга на расстоянии 5—8 см и прослушав какую-либо передачу. При противофазном включении громкоговорителей низкочастотные звуки будут сильно ослаблены.

Отметим, что фазировка на постоянном токе низкочастотной и высокочастотной головок двух- или трехполосного громкоговорителя с разделительными фильтрами не обеспечивает полной синфазности сигналов, излучаемых разными головками. Здесь сказываются фазовые сдвиги, вносимые разделительными фильтрами, и разность расстояний от низкочастотной и высокочастотной головок до слушателя. В результате этого сфазированные на постоянном токе головки при включении на выходы фильтра двухполосной схемы (см. рис. 77, *в*, *г*) излучают в противофазе и получается провал на частоте раздела, подобный показанному на рис. 91. Следовательно, низкочастотную и высокочастотную головку нужно включать в обратной полярности. В трехполосной схеме среднечастотную головку нужно включать в противофазе с низкочастотной и высокочастотной головками.

Возможные ошибки в фазировании можно исключить, применяя микрофон. Перед головками, по центру между ними, на расстоянии около 0,5 м устанавливают микрофон любого типа, лучше пьезоэлектрический, можно от слухового аппарата старого типа. Его включают на вход усилителя, а к выходу последнего присоединяют вольтметр. Пьезоэлектрический микрофон предпочтительнее потому, что его характеристика чувствительности имеет спад на низших частотах, которые в данном измерении являются помехой.

Громкоговоритель присоединяют к звуковому генератору, изменяют его частоту в некоторых пределах вверх и вниз от частоты раздела и фиксируют по вольтметру наличие или отсутствие провала. Затем, изменив включение выводов одной из головок, повторяют измерение. Правильным будет соединение головок, при котором будет отсутствовать провал на частоте раздела, видимый на рис. 91.

При втором способе проверки синфазности излучения головок используют два микрофона указанного выше типа и электронно-лучевой осциллограф, имеющий усилители горизонтальной и вертикальной разверток (например, ЭО-7). Затем на громкоговоритель подают от звукового генератора напряжение с частотой, равной частоте раздела, а микрофоны присоединяют ко входам горизонтального и вертикального отклонения луча (усилителям) осциллографа, в котором отключают развертку, и, поднеся оба микрофона к одной головке, проверяют их синфазность. Микрофоны синфазны, когда

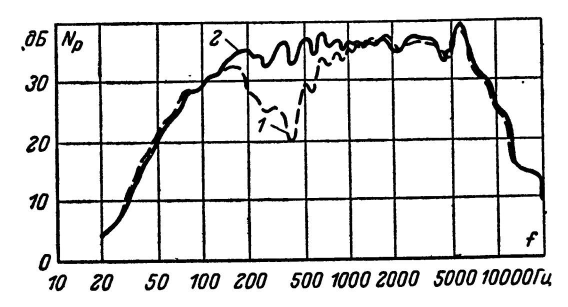


Рис. 91. Влияние фазировки на постоянном токе низкочастотной и среднечастотной головок на частотную характеристику двухполосного громкоговорителя.

1 — головки сфазированы; 2 — головки не сфазированы.

на экране осциллографа видна наклонная линия, поднимающаяся слева направо. После этого подносят каждый микрофон к разным головкам, и если головки излучают синфазно, то на экране осциллографа должна быть видна такая же фигура, какая была при поднесении обоих микрофонов к одной головке. Надо иметь в виду, что сдвиг по фазе на 90 или 270° обычно дает самая простая схема разделения, с крутизной среза 6 дБ на октаву. На экране осциллографа при таком сдвиге фаз будет виден круг. Не следует проверять фазировку одним из описанных способов при частоте раздела выше 3—4 кГц, так как малые длины звуковых волн, соответствующие этим частотам, делают результат проверки зависящим не только от фазы, но и от положения микрофонов, т. е. малодостоверным.

В утешение можно сказать, что при изменении фазировки головок, работающих в разных полосах при высокой частоте раздела, часто не наблюдается различия в характере звучания, а иногда даже лучшее звучание бывает при противофазном включении. Поэтому следует оставить такое включение, которое большинству слушателей при многократном прослушивании покажется наилучшим.

СТЕРЕОФОНИЧЕСКИЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Сущность стереофонического звуковоспроизведения, как известно, заключается в локализации источников звука, т. е. в том, что слушатель ощущает положение этих источников. Размер зоны, в пределах которой наблюдается стереофонический эффект, зависит

от расположения громкоговорителей, относящихся к левому (*А*) и правому (*Б*) стереоканалам. Наибольшая зона стереоэффекта получается при расположении громкоговорителей согласно рис. 92, *б*. Иное расположение громкоговорителей, как видно из рис. 92, *а*, *в*, нецелесообразно.

Расстояние между громкоговорителями (стереобаза) выбирают в пределах 1,5—3,0 м (в зависимости от размеров комнаты). Слушатели должны располагаться у громкоговорителей, не ближе $^2/_3$ этого расстояния. В небольшой комнате, площадью меньше 20—25 м², стереоэффект ослаблен.

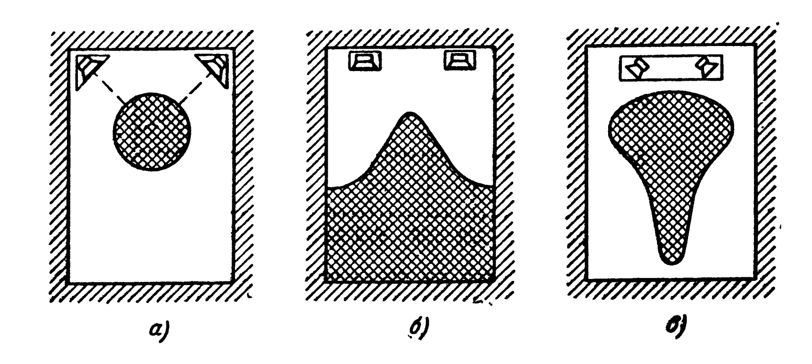


Рис. 92. Зоны стереоэффекта (заштрихованы) при размещении громкоговорителей в углах комнаты (*а*), при размещении громкоговорителей параллельно стене (*б*), при направлении осей громкоговорителей в разные стороны (*в*).

Для прослушивания стереофонических программ предпочтительна квадратная комната размером 20—25 м², при этом слушатели должны размещаться так, чтобы воображаемые линии, соединяющие слушателя с громкоговорителями, образовывали между собой угол в 35—60°. Если комната не квадратная, то громкоговорители следует поставить у более короткой стены.

Некоторое значение имеет направленность громкоговорителей в области средних частот. Более направленные громкоговорители обеспечивают более четкую локализацию кажущихся источников звука и ее меньшую зависимость от акустики помещения, но зона стереоэффекта при этом сужается.

Большинство двухканальных стереофонических устройств обеспечивает правильность информации о положениях кажущихся источников звука, когда слушатель расположен вблизи оси симметрии, проходящей посередине между громкоговорителями. При смещении слушателя в сторону от оси симметрии нарушается локализация кажущихся источников звука, т. е. появляются пространственные искажения. Причиной этих искажений при перемещении слушателя в стороны от оси являются запаздывание звукового сигнала от более удаленного громкоговорителя и уменьшение интенсивности его

звучания, вызванные неодинаковыми расстояниями до левого и правого громкоговорителей. Однако особенности нашего слуха позволяют скомпенсировать влияние временной разности прихода сигналов повышением уровня запаздывающего сигнала. Следовательно, если по мере ухода слушателя в сторону от оси симметрии повышать соответственно уровень запаздывающего сигнала, то пространственные искажения могут отсутствовать. Повышение уровня звукового сигнала при уходе в сторону от оси обеспечивается характеристикой направленности громкоговорителей; в диапазоне частот от 400 Гц до 5 кГц ось характеристики (максимум звукового

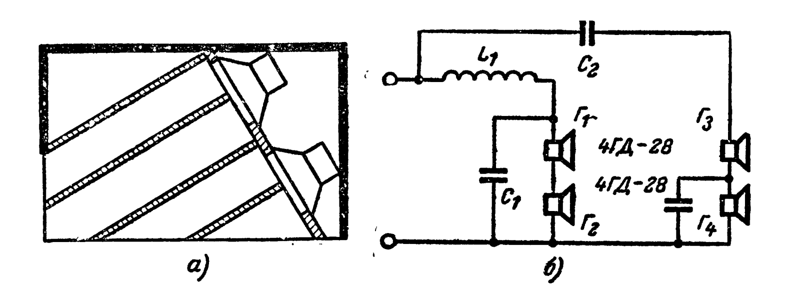


Рис. 93. Расположение среднечастотных головок в правом громкоговорителе электрофона «Корвет-стерео» (*а*); схема разделения полос (*б*).

давления) должна быть направлена под углом около 60° к оси симметрии звуковоспроизводящей системы. Такая характеристика направленности создается применением акустической линзы. Этот способ расширения зоны стереоэффекта приблизительно вдвое реализован в акустической системе отечественного электрофона первого класса «Корвет-стерео». В нем применены двухполосные громкоговорители с частотой раздела 300 Гц; их низкочастотные части содержат по две головки 4ГД-28, а средне- и высокочастотные — по две головки 1ГД-28. Головки установлены в ящике с открытой задней стенкой, причем головки 1ГД-28 находятся в верхней его части, в отдельном изолированном отсеке вместе с акустической линзой. На рис. 93, *а* показано расположение высокочастотных головок правого громкоговорителя (вид сверху); в левом громкоговорителе головки расположены зеркально относительно изображения на рис. 93, *а*. В связи с тем, что при звуках частотой выше 5 кГц направленность излучения громкоговорителей становится излишне высокой и получается перекомпенсация запаздывающего сигнала, одна из высокочастотных головок шунтирована конденсатором C_3 (рис. 93, *б*). Частотные характеристики уровней электрического напряжения на головках, характеризующие эффективность разделительных фильтров, приведены на рис. 94.

Следует отметить, что осуществленный в этих громкоговорителях поворот осей направленности излучения средних частот в сторону оси симметрии привел к значительной неравномерности частотной характеристики и сделал ее зависимой от смещения акустиче-

ской оси. На рис. 95 представлены частотные характеристики правого громкоговорителя, измеренные на расстоянии 1 м, при смещении микрофона на 1 м влево или вправо от оси громкоговорителя. Эти характеристики показывают, что слушатели, находящиеся слева и справа на большом расстоянии от акустической оси, будут ощущать ослабление звуков средних частот, поскольку спад частотной характеристики в полосе частот 600—2500 Гц достигает 12 дБ. Для устранения этого дефекта в акустическую систему «Корвет-стерео», видимо, необходимо добавить по фронтальной среднечастотной головке.

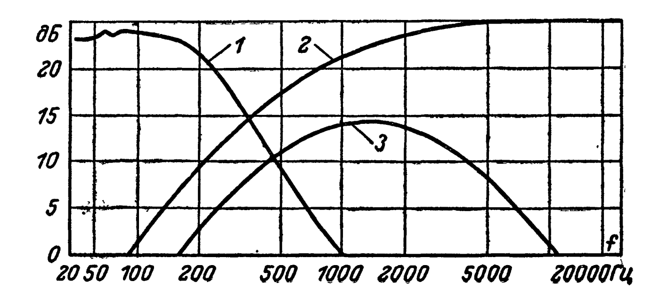


Рис. 94. Частотные характеристики уровней напряжения на головках громкоговорителя электрофона «Корвет-стерео».

1 — на головках $Г_1$ и $Г_2$; *2* — на головке $Г_3$; *3* — на головке $Г_4$.

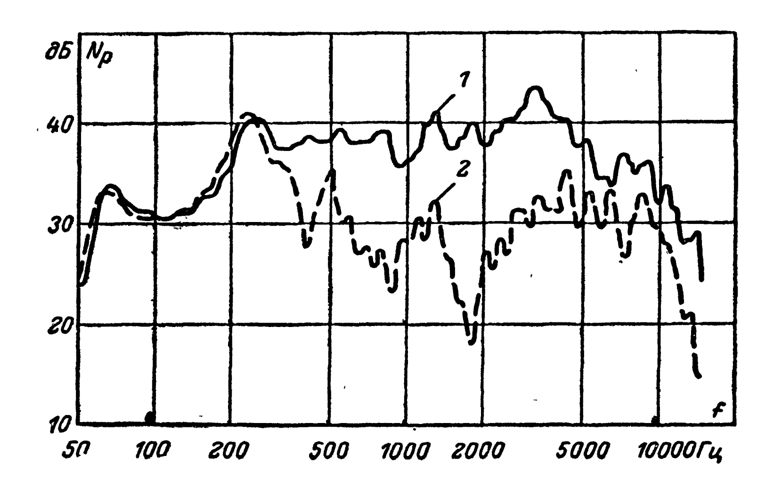


Рис. 95. Частотные характеристики правого громкоговорителя электрофона «Корвет-стерео» при смещении измерительного микрофона на 1 м с акустической оси громкоговорителя влево (*1*) и вправо (*2*).

Несколько по-другому решен вопрос расширения зоны стереоэффекта в громкоговорителе DVX фирмы CBS (США). Исследования фирмы показали, что оптимальная для стереофонии диаграмма направленности излучения громкоговорителя в полосе частот, наиболее важной в создании стереоэффекта, должна иметь приблизительно форму косинусоиды («восьмерки»). Такой характеристикой направленности излучения обладает дипольный излучатель, которым является головка в небольшом акустическом экране. Акустические оси громкоговорителей должны пересекаться под углом около 110—120° (рис. 96). В результате, когда слушатель находится

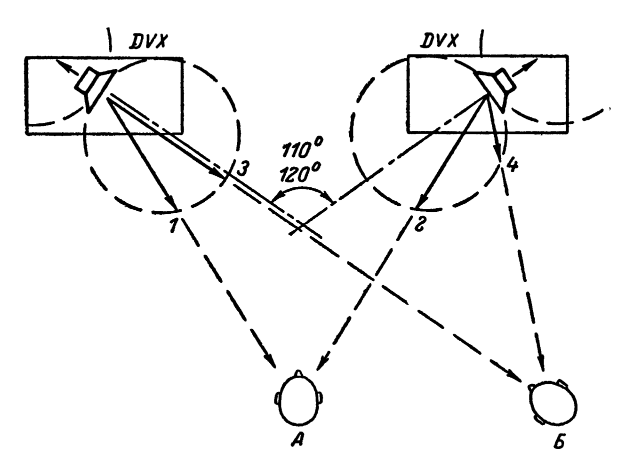


Рис. 96. Расположение громкоговорителей с дипольной характеристикой направленности.

на оси стереозоны (в точке *А*), звуковые давления, создаваемые правым и левым громкоговорителями, равны, как это показывают векторы (стрелки) *1* и *2* на их диаграммах направленности. При перемещении слушателя в сторону от оси (например, в точку *Б*) звуковое давление, создаваемое ближайшим, правым, громкоговорителем уменьшится, а создаваемое удаленным, левым, возрастает, как это показано стрелками *3* и *4* на соответствующих характеристиках направленности.

Громкоговоритель DVX четырехполосный; в нижней части ящика фазоинвертора *9* (рис. 97) расположена низкочастотная головка *4* диаметром 365 мм. Отверстие фазоинвертора обозначено цифрой *2*. В верхней части ящика, немного меньшей высоты, на вертикальной панели *1*, которая может поворачиваться на угол около 180°, установлены: вверху головка *5* диаметром 200 мм, воспроизводящая полосу частот 250—1000 Гц, и под нею головка *7* диаметром 75 мм, воспроизводящая полосу частот 1—5 кГц. Обе эти головки имеют открытые сзади диффузоры, т. е. излучают звук в обе стороны (у головки *5* это необходимо для образования диполя, а у головки *7* необходимая форма направленности получается благода-

ря уменьшению длины волны излучаемых частот). По бокам панели установлены две высокочастотные головки *6*, не излучающие звук назад (с полусферической диафрагмой), которые воспроизводят полосу частот 5—20 кГц. Верхняя часть ящика акустически прозрачна, так как выполнена из сетки; передняя сетчатая стенка может быть снята для поворота панели с головками и переключения частотного корректора *8* на одну из трех частотных характеристик. Угол поворота отсчитывают по шкале *3*. Фазировка громкоговорителей в стереофонии имеет еще большее значение, чем в монофонии. При нарушении синфазности колебаний, излучаемых громкоговорителями, локализация средней точки между ними будет нечеткой, станет невозможной точная регулировка стереобаланса и будут ослаблены звуки низших частот. Наличие в устройстве последних двух дефектов может служить указанием на необходимость проверки фазировки громкоговорителей. Ее следует осуществить по методике, описанной выше, с использованием двух микрофонов и осциллографа.

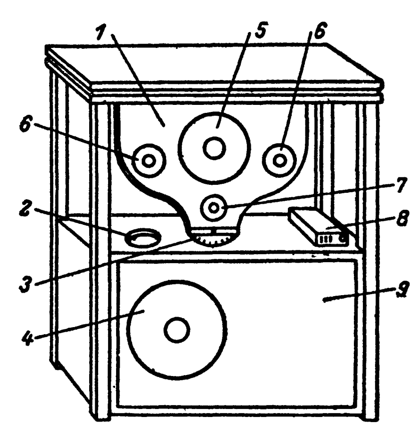


Рис. 97. Расположение в ящике элементов конструкции громкоговорителя фирмы CBS с дипольной характеристикой направленности.

Стереосистема с тремя громкоговорителями. Поскольку направление на источник звука ощущается преимущественно на средних и верхних частотах, локализация воспроизведения низкочастотных составляющих сигнала (примерно ниже 300 Гц) в стереофонии не имеет существенного значения. В связи с этим имеется возможность упростить и удешевить стереофоническое звуковоспроизводящее устройство: применить общий для обоих стереоканалов центральный низкочастотный громкоговоритель, излучающий колебания с частотами ниже 300 Гц, и два боковых громкоговорителя (левый и правый), воспроизводящих звуки с частотами выше 300 Гц.

Так как среднечастотная и высокочастотная головки имеют небольшие габариты, а низкочастотная значительно большие, может быть достигнута существенная экономия не только в стоимости, но и в объеме стереофонического устройства. Введение в двухканальную стереофоническую систему третьего, центрального громкоговорителя позволяет при подаче на него сигналов обоих каналов исключить возможность возникновения впечатления «дыры в середине», т. е. провала в звучании в центре (посередине между громкоговорителями). Такая «дыра» бывает особенно заметна при большом расстоянии между громкоговорителями левого и правого каналов и при близком расположении слушателей.

Дополнительный громкоговоритель (акустическая система) под-

ключают к выходам усилителей правого и левого каналов так, чтобы исключить переход сигналов из одного канала в другой и не увеличивать нелинейных и фазовых искажений. Одна из таких схем включения приведена на рис. 98.

Переменный резистор R служит для регулировки уровня интенсивности звука дополнительного громкоговорителя. Этот резистор должен иметь сопротивление в 5—10 раз большее, чем сопротивление низкочастотной головки.

Псевдостереофония. Простейшая схема устройства, с помощью которого можно получить псевдостереофонический эффект, представ-

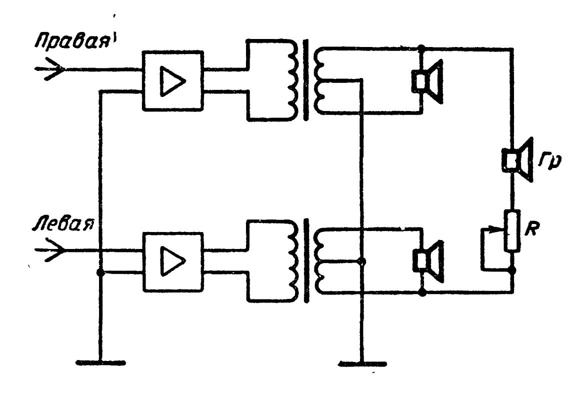


Рис. 98. Схема включения дополнительного громкоговорителя, суммирующего сигналы каналов стереофонической системы.

лена на рис. 99, *а*. Используемые в этом устройстве головки излучают синфазно на низших частотах и в противофазе на высших.

Существует другая псевдостереофоническая система, которая по создаваемому ею слуховому ощущению может конкурировать со стереофонической, хотя представления о локализации источника сама по себе не дает. Такую псевдостереофоническую систему можно применить как при монофоническом, так и при стереофоническом звуковоспроизведении; в последнем случае получается некоторое подобие квадрафонии. Автору довелось слышать звучание этой псевдостереофонической системы и при монофоническом и при стереофоническом воспроизведении. Оно оказалось весьма впечатляющим — объемным и очень живым и приятным. Особенно неожиданным это было при прослушивании монофонических записей.

Сущность этой псевдостереофонической системы, точнее добавления, состоит в том, что каждый звуковоспроизводящий канал (один в монофонии и два в стереофонии) заменяется двумя каналами, воспроизводящими один и тот же сигнал, но отличающимися по фазе на 90°. Реализуется это добавлением второго выходного каскада в усилителе каждого канала звуковоспроизведения и включением между предварительным усилителем и обоими выходными каскадами широкополосного фазовращателя, который создает постоянный фазовый сдвиг 90° между сигналами, подаваемыми на выходные каскады. К каждому выходному каскаду присоединяется

отдельный громкоговоритель, располагаемый на расстоянии 1—2 м от другого. Для применения описанной псевдостереофонической системы в монофоническом звуковоспроизводящем устройстве необходимы дополнительный выходной усилительный каскад с громкоговорителем и широкополосный фазовращатель. В стереофоническом устройстве число дополнительных элементов удваивается.

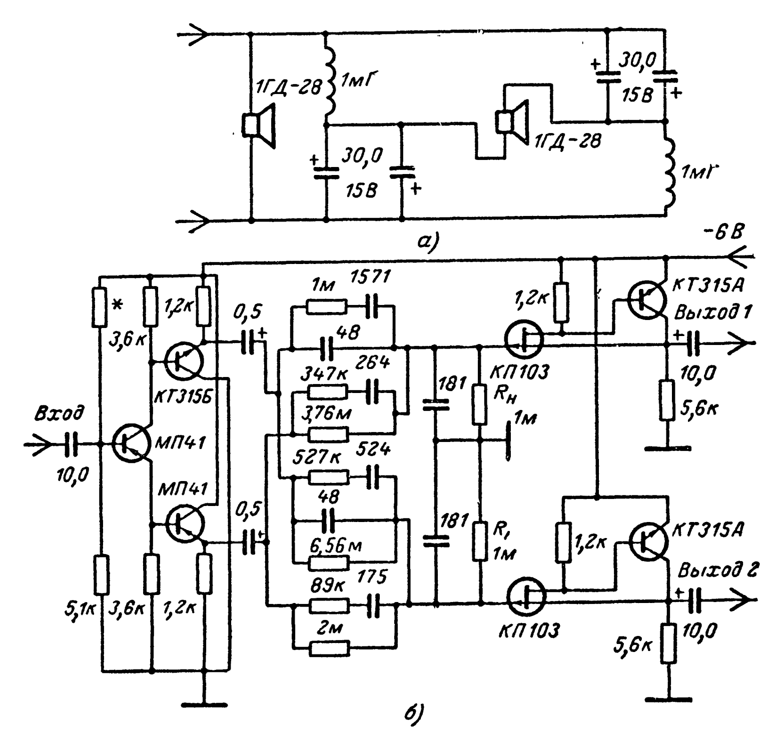


Рис. 99. Схемы псевдостереофонических приставок.

а — простейшая; *б* — с широкополосным фазовращателем.

Схема фазовращателя, создающего два напряжения с номинальной разностью фаз 90° в полосе частот 100 Гц — 10 кГц и рассчитанного на нагрузку 1 МОм, приведена на рис. 99, *б*.

Каскады с полевыми транзисторами, включенные на выходе фазовращателя, благодаря высокому входному сопротивлению позволяют увеличить расчетное сопротивление нагрузочных резисторов $R_н$ и этим уменьшить емкости конденсаторов фазовращателя. При желании обойтись без полевых транзисторов сопротивления всех резисторов фазовращателя должны быть уменьшены, а емкости конденсаторов увеличены в одинаковое число раз, например в 100. Отклонение величин сопротивления и емкостей от номинальных должно быть не более 1—3%.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Применение электромеханической (электродинамической) обратной связи для улучшения характеристик громкоговорителя было запатентовано еще в начале 1924 г. Самое удивительное, что широкое применение отрицательной обратной связи в усилительных устройствах началось только десять лет спустя. Несмотря на такую давнюю известность, практический интерес к электромеханической обратной связи пробудился лишь несколько лет назад: когда появились описания радиолюбительских конструкций и промышленных разработок, в которых применяется эта обратная связь, когда фирма Matsushita (Япония) выпустила низкочастотную головку EAS-20PZ33 мощностью 10 Вт, содержащую дополнительную катушку, специально для получения э. д. с. обратной связи, а фирма Philips (Голландия) выпустила в 1973 г. высококачественный настольный радиограммофон типа 22RH532, в низкочастотной головке которого используется электромеханическая обратная связь.

Электромеханическая обратная связь, использующая э. д. с., создаваемую колебательными движениями звуковой катушки головки и подаваемую на вход усилителя, питающего громкоговоритель, способна частично скомпенсировать отрицательное влияние закрытого ящика, снизив основную резонансную частоту громкоговорителя. Она также значительно уменьшает нелинейные искажения громкоговорителя, максимальные на низших частотах.

Применение электромеханической обратной связи имеет некоторые особенности. Подобно тому как введение в усилитель отрицательной обратной связи требует увеличения коэффициента усиления, так и применение электромеханической отрицательной обратной связи для снижения низшей частоты, воспроизводимой громкоговорителем, требует увеличения мощности усилителя, а иногда и головки.

Посмотрим, во что обходится электромеханическая обратная связь. Известно, что ниже основной резонансной частоты громкоговорителя в закрытом ящике создаваемый им уровень звукового давления уменьшается на 12 дБ на октаву. Если низшую граничную частоту громкоговорителя нужно уменьшить на $^1/_2$ октавы, например с 60 Гц до 42 Гц, то звуковое давление на частоте 42 Гц следует увеличить на 6 дБ (в 2 раза). Создаваемое громкоговорителем на низших частотах звуковое давление пропорционально колебательному ускорению диффузора и звуковой катушки, а ускорение последней в свою очередь пропорционально подводимому напряжению и току через нее. Следовательно, в рассматриваемом случае уровень мощности подводимого сигнала должен быть увеличен на низшей частоте также на 6 дБ, что соответствует четырехкратному повышению выходной мощности усилителя. Конечно, звуковая катушка головки должна кратковременно допускать такую перегрузку. При желании снизить граничную частоту на одну октаву, необходимо увеличить уровень выходной мощности усилителя на 12 дБ (мощность в 16 раз).

Применяемая радиолюбителями схема электромеханической обратной связи с использованием возникающей в звуковой катушке противо-э. д. с. и отделение ее от сигнала, питающего громкоговоритель, с помощью моста наиболее простая из возможных.

Существует еще один способ получения напряжения электромеханической обратной связи, пропорционального колебательному ускорению звуковой катушки. Этот способ, предложенный фирмой Phi-

lips, состоит в том, что напряжение обратной связи получается от пьезокерамического вибroприемника (акселерометра), жестко укрепленного на ребре каркаса звуковой катушки, в месте соединения ее с диффузором.

В качестве виброприемника можно использовать отечественный пьезокерамический элемент от звукоснимателя ПЭК-55, который крепится одним концом и закрывается экраном из алюминия толщиной 0,1—0,3 мм.

Несмотря на высокие акустические показатели, достигнутые в радиоле 22RH532, необходимо подчеркнуть, что электромеханическая обратная связь не обладает «волшебными» свойствами. Частотная характеристика устройства в области низших частот может быть расширена более просто и дешево частотным корректором (регулятором частотной характеристики), включенным перед оконечным усилителем. В обоих случаях мощность усилителя должна быть увеличена пропорционально получаемому подъему составляющих низших частот, а головка должна эту мощность выдерживать. Что же касается нелинейных искажений, то их значение может быть снижено применением надлежащего акустического оформления громкоговорителя (например, фазоинвертора) и улучшением конструкции низкочастотной головки. Конечно, уменьшение нелинейных искажений вызовет удорожание головки. Однако сейчас еще нельзя с уверенностью сказать, что является более целесообразным: применение более дешевой, но худшей по показателям головки с электромеханической обратной связью или более дорогой головки с лучшими показателями, но без такой обратной связи.

РЕМОНТ ГОЛОВОК ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Необходимость в ремонте головки может возникнуть при повреждении ее во время транспортировки, установке в ящике, а также при обрыве звуковой катушки. Наиболее частыми повреждениями являются вмятины, разрывы (трещины) и отверстия на диффузоре. При повреждении гофра следует расправить и сблизить рваные края отверстия и, если между ними есть небольшой просвет, промазать кремнийорганическим клеем — герметиком эластосил или резиновым клеем. Если же просвет между краями больше 1—3 мм, следует наложить заплату минимально необходимой площади из мягкой бумаги толщиной 0,1—0,15 мм (такой, как некоторые сорта промокательной или фильтровальной) или от старого диффузора; последнюю для уменьшения толщины обычно можно расслоить. Когда повреждена конусообразная часть диффузора поступают аналогичным образом, но заплата может иметь большую толщину (до 0,20—0,25 мм), а клей — марки БФ-4 или АК-20. Если гофр диффузора поврежден в нескольких местах, может оказаться целесообразным удалить его и заменить гибким воротником, как описано дальше.

Перемотка звуковой катушки требует некоторых навыков и наличия приспособления, состоящего из трубки (болванки) и конуса на резьбе (рис. 100). Детали эти можно изготовить из металла, пластмассы или дерева твердых пород (дуб, бук). Внешний диаметр трубки должен быть равен внутреннему диаметру каркаса перематываемой звуковой катушки. Для облегчения снятия с приспособления перемотанной звуковой катушки по длине трубки де-

лают разрез. Конус нужен для того, чтобы диаметр болванки звуковой катушки при намотке не мог уменьшиться в результате сжатия. Перед намоткой освобождают каркас звуковой катушки от старой обмотки, растворив клей, которым скреплены ее витки (клей БФ-4 растворяют спиртом, клей АК-20 — ацетоном). После удаления старой обмотки на каркасе не должно быть остатков клея.

Намотку делают проводом такого же диаметра. Перед намоткой промазывают жидким клеем каркас, а при намотке каждый уложенный слой. Намотку ведут непрерывно, чтобы клей не успевал загустеть. Клей наносят слоем, равным по толщине приблизительно половине диаметра провода, с помощью нежесткой кисти с невылезающими волосками (кисть, которая теряет волос, непригодна). После окончания намотки и закрепления конца провода рекомендуется, вращая катушку, покрыть обмотку клеем и продолжать вращать еще несколько минут трубку с катушкой, чтобы клей начал отвердевать, не образуя подтеков. Клей АК-20 отвердевает примерно через 1 ч; катушку снимают с болванки по истечении этого времени. Клей БФ-4 для полного отвердевания надо выдержать около 4 ч при температуре 35—40°С. Перед снятием катушки с намоточного приспособления следует смыть растворителем клей между трубкой и краем каркаса звуковой катушки. Чтобы облегчить снятие катушки, рекомендуется перед намоткой смазать трубку машинным маслом или вазелином у краев каркаса. Пайку концов обмотки к контактам на диффузоре производят припоем ПОС-61 или ПОС-40 с канифолью в качестве флюса; при этом надо соблюдать осторожность, чтобы не прожечь диффузор.

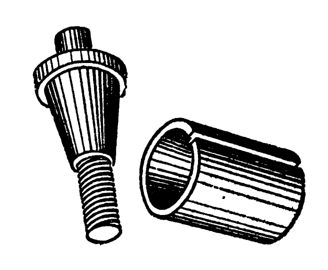


Рис. 100. Приспособление для намотки звуковой катушки.

СНИЖЕНИЕ ОСНОВНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ ГОЛОВКИ

Как мы уже говорили, нижняя граница рабочего диапазона частот головки определяется основной резонансной частотой ее подвижной системы $f_р$.

Многие из выпущенных в прошлые годы хороших головок (в первую очередь это относится к головкам, выпущенным кинопромышленностью) имеют недостаточно низкую основную резонансную частоту. Ее можно снизить, увеличив массу диффузора и звуковой катушки или гибкость их подвеса, либо сделать то и другое одновременно. Наиболее просто увеличить массу диффузора, укрепив на нем дополнительный груз. Однако увеличение массы подвижной системы головки невыгодно, так как при этом снижается не только резонансная частота головки, но и создаваемое ею звуковое давление. Происходит это, как указано выше, потому, что приложенная к звуковой катушке сила зависит для данной головки только от значения тока; увеличив массу, мы уменьшим во столько же раз колебательное ускорение катушки и диффузора, а создаваемое головкой в этой области частот звуковое давление пропорционально

ускорению диффузора. Таким образом, уменьшение ускорения ведет и уменьшению звукового давления.

Если бы мы попытались снизить вдвое основную резонансную частоту головки увеличением массы, это потребовало бы увеличения массы подвижной системы в 4 раза и во столько же снизилось бы создаваемое головкой звуковое давление (при неизменном значении

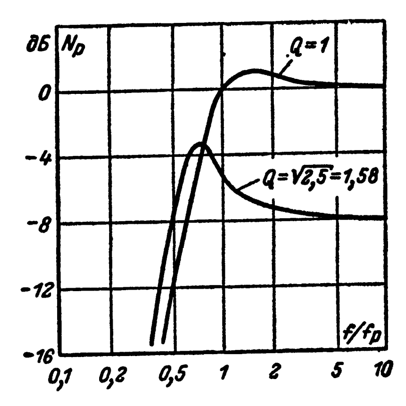


Рис. 101. Частотные характеристики, показывающие влияние увеличения массы подвижной системы головки на излучаемую мощность.

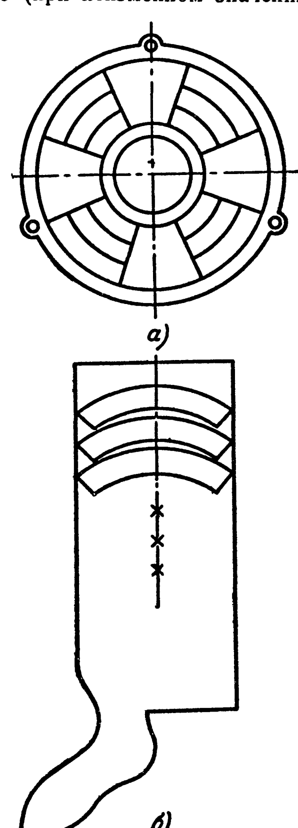


Рис. 102. Центрирующая шайба с вырезами (*а*) и разметка дужек для подвеса диффузора (*б*).

тока в катушке). Кроме того, увеличение массы повысило бы добротность подвижной системы и увеличило резонансный пик, т. е. неравномерность частотной характеристики; это в свою очередь ухудшило бы переходные характеристики громкоговорителя. Указанное иллюстрирует рис. 101, на котором приведены в относительном масштабе частотные характеристики головки до и после увеличения массы подвижной системы в 2,5 раза.

Следовательно, резонансную частоту головки можно снижать только путем увеличения гибкости подвеса диффузора и центрирующей шайбы, т. е. уменьшением жесткости крепления подвижной

системы. Делают это следующим образом. Отклеив или отрезав воротник диффузора острым скальпелем или лезвием по кольцу диффузородержателя, отпаивают гибкие выводы звуковой катушки и отвинчивают кольцо центрирующего диска или гетинаксовый «паук» (если таковые имеются) или отклеивают от диффузородержателя центрирующий диск. Гибкость центрирующего диска с гофрами увеличивают прорезанием 3—4 конусообразных вырезов (рис. 102, *а*), расположенных равномерно по окружности; до прорезания намечают по картонному шаблону контуры этих отверстий. Их общая площадь должна составлять 0,4—0,5 площади гофров центрирующего диска. Сделав вырезы, на них или на весь диск наклеивают в нескольких точках резиновым клеем, лаком АВ-4 или клеем БФ-6 марлю или кусочек чулка для защиты воздушного зазора от пыли. Если звуковая катушка центрируется гетинаксовым или текстолитовым «пауком», то его гибкость увеличивают уменьшением ширины дужек путем запиливания или осторожного обкусывания кусачками. После этого обрезают часть краевого гофра диффузора с тем, чтобы между краем диффузора и кольцом диффузородержателя был промежуток 15—18 мм. Если при этом на краю диффузора остался гофр, то его расправляют на длине около 10 мм с тем, чтобы к нему приклеить подвес. Последний делают в виде дужек из павинола или мягкого текстовинила. Чтобы увеличить его гибкость, следует по возможности удалить текстильную или трикотажную подложку.

Очень гибкие и эластичные дужки можно изготовить из ненужных тонких капроновых чулок и клея эластосил. Голенище чулок разрезают вдоль и, развернув, получают полотно шириной 240—280 мм; сделав разметку, как показано на рис. 102, *б*, устанавливают требуемое количество материала. При разметке дужки нужно располагать поперек чулка, как показано на рисунке, ввиду того что эластичность чулка больше в продольном направлении. Затем какую-нибудь дощечку или кусок толстого картона покрывают куском гладкой полиэтиленовой (не целлофановой) пленки, накладывают чулочный трикотаж, расправляют и закрепляют его по краям кнопками или гвоздиками. После этого шпателем или торцом металлической линейки наносят эластосил на трикотаж тонким слоем, но чтобы нити трикотажа не были видны. Через сутки (время полимеризации эластосила) трикотаж переворачивают и наносят эластосил на другую сторону. Для вырезания дужек из изготовленного материала или указанных выше промышленных материалов следует изготовить картонный шаблон. Желательно подвесить диффузор не более чем на трех или четырех дужках; каждая дужка должна покрывать соответственно 1/3 или 1/4 длины окружности диффузора. На дужках и на краю диффузора карандашом или шариковой ручкой отмечают поверхности, которыми они должны быть склеены; ширина поверхностей должна составлять 7—10 мм. После этого намазывают поочередно дужки (но не диффузор!) клеем и приклеивают их к отмеченному краю диффузора. Дужки из чулка приклеивают либо эластосилом, либо кремнийорганическим клеем КТ-30 или МСН-7.

Дужки из павинола или текстовинила приклеивают поверхностью, где находился текстиль, клеем БФ-2 (4), К88 или АВ-4. Рекомендуется предварительно проверить пригодность клея для данного материала, приклеив кусочек материала к плотной бумаге. Стыки между дужками нужно склеить так, чтобы между ними не было щелей,

лучше всего эластосилом. Края павиноловых или текстовиниловых дужек можно скрепить нитками и залить в несколько приемов резиновым клеем.

Сделав подвес диффузора, его устанавливают в диффузородержатель так, чтобы звуковая катушка вошла в зазор, укрепляют кольцо центрирующего диска и до приклейки подвеса осуществляют предварительную центровку звуковой катушки. После этого поочередно приклеивают к кольцу диффузородержателя дужки подвеса диффузора, намазывая клеем предварительно намеченные места. Для отгибания дужек при намазывании их клеем удобно использовать зажимы «крокодил» с вставленными в них однополюсными вилками (для тяжести). После подклейки подвеса производят окончательную центровку звуковой катушки и закрепляют кольцо центрирующей шайбы или гетинаксового «паука». Если центрирующая шайба не имеет металлического кольца и была отклеена, то сначала приклеивают подвес диффузора, а затем центрирующую шайбу одновременно с центровкой звуковой катушки в зазоре. Затем припаивают выводы звуковой катушки и приклеивают к диффузородержателю опорные дужки из картона, губчатой резины или войлока. Описанным способом удается снизить частоту основного резонанса головки в 1,5—2 раза.

Увеличить жесткость диффузора вблизи звуковой катушки и улучшить этим воспроизведение высших частот можно, покрыв центральную часть поверхности диффузора радиусом 50—70 мм клеем КТ-30 или МСН-7, разведенным в бензоле или толуоле; после высыхания эти клеи обладают твердостью около 0,9 твердости стекла.

ПРОВЕРКА ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Проверку акустических систем и отдельных головок осуществляют объективным методом с помощью измерительного микрофона или субъективно — на «слух», что, однако, весьма эффективно. При наличии измерительного конденсаторного микрофона (МИК-6с, МК-5 или МК-6 отечественного производства или 4145, 4133 датской фирмы Bruel & Kjaer) с усилителем, вольтметра и осциллографа, а также звукового генератора или шумового генератора с фильтрами можно измерить частотную характеристику громкоговорителя по звуковому давлению и значению коэффициента гармоник[1].

К сожалению, немногие радиолюбители имеют возможность воспользоваться указанными приборами. Легче измерить частотную характеристику напряжения на головках, работающих в разных полосах частот, и частотную характеристику модуля полного сопротивления головки. Если его значение неизвестно, измерение необходимо для расчета согласования головки с выходом оконечного каскада усилителя низкой частоты, а при работе нескольких головок для обеспечения правильного согласования их между собой и с разделительными фильтрами двух- или трехполосной системы.

По частотной характеристике модуля полного электрического сопротивления головки можно определить основную резонансную частоту подвижной системы и качество ее подвеса. Правильность выбора объема закрытого ящика и настройки фазоинвертора также

---

[1] Методика измерения параметров громкоговорителей изложена в ГОСТ 16122-70.

определяют по частотной характеристике модуля полного сопротивления.

Модуль полного сопротивления измеряют в рабочем диапазоне частот головки при подведении к ней небольшого (около 0,5—1 В) напряжения от генератора звуковой частоты G (рис. 103) или от звукоснимателя при проигрывании измерительной грампластинки. Измерение проводят методом замещения, используя магазин сопротивлений R_1 (при одинаковых показаниях вольтметра в обоих положениях переключателя модуль полного сопротивления головки равен включенному сопротивлению магазина).

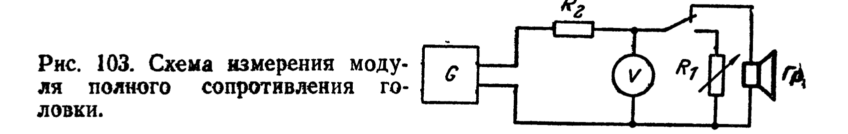


Рис. 103. Схема измерения модуля полного сопротивления головки.

Можно также измерить модуль полного сопротивления с помощью закона Ома, включив дополнительный резистор R_2, сопротивление которого в 25—30 раз больше модуля полного сопротивления головки $|Z_г|$ (обычно $R = 150 \div 250$ Ом, номинальная мощность 2—3 Вт). Магазин сопротивлений заменяют постоянным резистором, сопротивление которого должно быть известно и близко к предполагаемому значению $|Z_г|$. Измерив вольтметром напряжение U_R на этом резисторе, а затем напряжение на звуковой катушке головки $U_г$, определяют модуль ее полного сопротивления на данной частоте по формуле

$$|Z_г| = U_г R_1 / U_R .$$

Представив результаты измерений в виде частотной характеристики, можно узнать основную резонансную частоту по положению максимума. Резонансную частоту подвижной системы головки можно также определить с помощью электронного осциллографа. При наличии фазового сдвига между током в звуковой катушке и напряжением на ней на экране трубки наблюдается наклонный эллипс. С уменьшением угла фазового сдвига эллипс сужается, а в отсутствие сдвига превращается в прямую линию, угол наклона и длина которой могут изменяться по сравнению с длиной и наклоном эллипса. Переход эллипса в прямую линию указывает на наличие резонанса.

Схема включения звуковой катушки головки громкоговорителя для определения резонансной частоты по фазовому сдвигу показана на рис. 104. Катушку подключают к выходу звукового генератора G мощностью не менее 2—3 Вт через резистор R сопротивлением 200—300 Ом, напряжение с которого подают на пластины горизонтального отклонения осциллографа (X). Напряжение со звуковой катушки подается на пластины вертикального отклонения (Y). Выход звукового генератора не должен быть заземлен, а горизонтальная развертка в осциллографе должна быть отключена.

На рис. 104, *б*, *в* приведены типовые частотные характеристики модуля полного сопротивления головки в щите и в фазоинверторе и изображены вероятные фигуры на экране осциллографа для раз-

ных точек этих характеристик. При измерении $|Z_г|$ головки или при определении по осциллографу частоты ее основного резонанса головку следует расположить магнитной системой вниз. Если положить ее вниз диффузором, то замкнутый воздушный объем под диффузором существенно изменит результаты измерения параметров головки.

Проверка акустической системы «на слух» состоит в прослушивании какого-либо оркестрового произведения или произведения, ис-

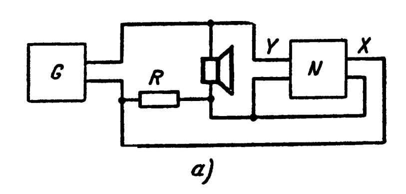
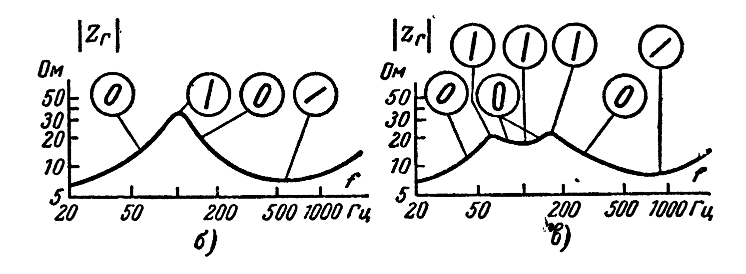


Рис. 104. Определение резонансных частот головки с помощью осциллографа.

а — схема соединения головки с электронным осциллографом; *б* — фигуры на экране осциллографа для разных точек частотной характеристики модуля полного сопротивления головки, смонтированной на щите; *в* — то же в фазоинверторе.



полняемого на рояле. При этом легче всего заметить искажения. При прослушивании устанавливают, достаточно ли хорошо воспроизводятся звуки низших и высших частот, а также убеждаются в отсутствии нелинейных искажений (дребезжание, хрипы) при наибольших допустимых уровнях интенсивности звука. Проверка эффективности работы головок в разных частотных полосах несколько облегчается возможностью отключения высокочастотной головки и замены ее среднечастотной, как это показано, например, на схеме рис. 105. Здесь в первом положении переключателя включены все три головки. Во втором положении отключается высокочастотная головка и ее функции «возлагаются» на среднечастотную головку, на которую подается напряжение высших и средних частот, лежащих выше первой частоты раздела. В третьем положении переключателя отключается среднечастотная головка и работают только низкочастотная и высокочастотная, последняя в области частот выше второй частоты раздела; в этом положении воспроизводятся звуки только низших и высших частот. Если амплитудно-частотную характеристику усилителя вместе с разделительными фильтрами (т. е. напряжение на звуковых катушках головок) измерить не удалось, то придется ограничиться прослушиванием звучания громкоговорителя при питании его от звукового генератора.

Нелинейные искажения создаются как выходным каскадом усилителя, так и громкоговорителем. С возрастанием громкости они обычно увеличиваются. Опасность появления искажений увеличивается в том случае, если мощность усилителя превышает мощность громкоговорителя. Чтобы определить, где возникают нелинейные искажения — в усилителе или громкоговорителе, поступают следующим образом. На выход усилителя включают переменный резистор с сопротивлением, равным номинальному сопротивлению нагрузки

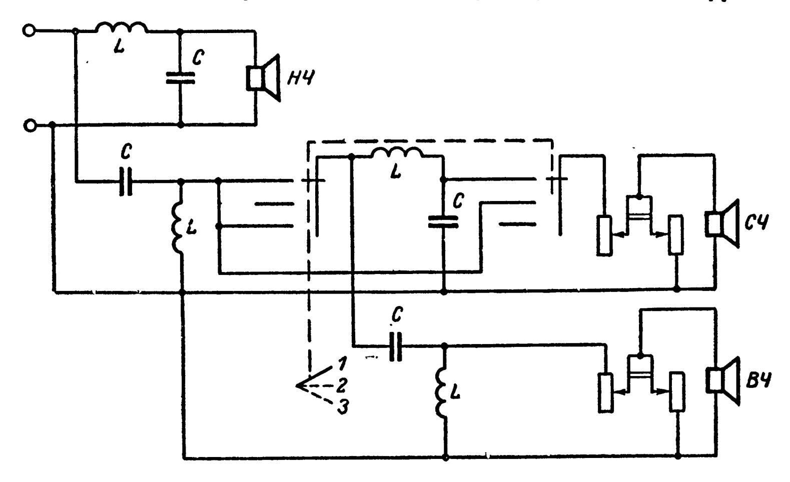


Рис. 105. Схема для отключения высокочастотной (положение *2* переключателя) или среднечастотной (положение *3*) головки с регуляторами уровней.

усилителя или близкими к нему. Допустимая мощность рассеивания резистора должна быть не менее максимальной выходной мощности усилителя. Громкоговоритель включают между движком и одним из крайних выводов переменного резистора. Изменяя положение движка, устанавливают пониженную громкость при входном напряжении усилителя, соответствующем его номинальной мощности. Если звук будет искажен, наиболее вероятным источником искажений является усилитель, поскольку с усилителя снимается полная мощность, а громкоговоритель недогружен. Если же передача будет неискаженной, то, очевидно, искажения, замеченные при прослушивании установки, создает громкоговоритель из-за его перегрузки или плохой центровки звуковой катушки.

Радикальным средством проверки и установления неисправности элемента звуковоспроизводящей установки является замена подозреваемого звена заведомо хорошим. Предполагая неисправность громкоговорителя, следует прослушать работу установки с хорошим громкоговорителем.

При сравнении качества звучания двух громкоговорителей, решая вопрос о лучшем из них, надо отдать предпочтение тому, который более натурально воспроизводит передаваемый материал.

Поскольку увеличение звукового давления в области основного резонанса подвижной системы головки зависит от ее добротности, а она зависит и от значения выходного сопротивления усилителя $R_{вых}$, для оценки условий электрического демпфирования головки нужно измерить это сопротивление.

Методика измерения не сложна. На вход усилителя подают небольшой (составляющий 10—20% номинального значения) синусоидальный сигнал какой-либо частоты от звукового генератора, электропроигрывателя с измерительной грампластинки или от электросети через понижающий трансформатор и измеряют выходное напряжение усилителя при отключенной нагрузке (громкоговорителе). Затем нагружают выход усилителя резистором, сопротивление которого $R_н$ близко по значению к номинальной нагрузке, и измеряют напряжение на нем. Выходное сопротивление усилителя вычисляют по формуле

$$R_{вых} = (U_{х.х} - U_н) R_н / U_н,$$

где $U_{х.х}$ — выходное напряжение усилителя без нагрузки; $U_н$ — выходное напряжение на нагрузке.

У хорошего усилителя $R_{вых} \leqslant 0{,}1\, R_н$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабуркин В. Н., Гензель Г. С., Павлов Н. Н.** Электроакустика и радиовещание. М., «Связь», 1967. 312 с.

2. **Римский-Корсаков А. В.** Электроакустика. М., «Связь», 1973. 272 с.

3. **Иофе В. К.** Электроакустика. М., Связьиздат, 1954. 184 с.

4. **Фурдуев В. В.** Акустические основы вещания. М., «Связь», 1960. 320 с.

5. **Болотников И. М.** Громкоговорители. М., «Искусство», 1971. 272 с.

6. **Шифман Д. Х.** Громкоговорители. М., «Энергия», 1965. 248 с.

7. **Бессон Р.** Все о стереофонии. М., Госэнергоиздат, 1963. 128 с.

8. **Авраменко В. Л., Галямичев Ю. П., Ланнэ А. А.** Справочник. Электрические линии задержки и фазовращатели. М., «Связь», 1973. 112 с.

9. **Справочник.** Звукопоглощающие материалы и конструкции. М., «Связь», 1970. 124 с.

10. **ГОСТ 9010-73.** Головки громкоговорителей динамические прямого излучения. Общие технические условия.

11. **ГОСТ 16122-70.** Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний и измерений.

Основные данные электродинамических головок громкоговорителей прямого излучения

Тип головки	Номинальный диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Основная резонансная частота, Гц	Среднее стандартное звуковое давление, Па	Модуль полного сопротивления на частоте 1 кГц, Ом	Размеры, мм	Тип магнита	Масса, г, не более
1ГД-1ВЭФ	200—4 000	14	240±40	0,23	6,5±0,7	∅90×57	К	250
1ГД-2ВЭФ	2000—15 000	15	1900±300	0,2	6,5±0,7	∅90×57	К	250
1ГД-3ВЭФ	5000—18 000	12	4500±1000	0,30	12,5±1,5	∅70×27	Ф	180
1ГД-4	100—10 000	12	120±20	0,30	8±1,2	150×100×58	К	250
1ГД-5	150—6000	15	120±20	0,20	6,5±0,7	∅126×50	А	370
1ГД-6	100—6000	15	100±10 140±10	0,30	6,5±0,7	∅126×63	А	600
1ГД-9	100—7000 200—10 000	14	95±15 150±30	0,25	6,5±0,7	∅156×98×56	К	250
1ГД-10	120—7000	15	120±20	0,25	6,5±1,0	156×98×48	Ф	370
1ГД-11	100—7000	15	100±10 140±10	0,28	6,5±1,0	∅126×45	Ф	300
1ГД-12	200—10 000	14	175±15	0,25	5,0±0,5	156×98×41	Ф	200
1ГД-14	150—10 000	14	150±30	0,25	5,0±0,5	∅125×45	Ф	180
1ГД-18	100—10 000	15	100±15	0,23	6,5±0,7	156×98×48	К	160
1ГД-19	100—10 000	15	100±15	0,20	6,5±1,0	156×98×44	Фэ	200
1ГД-20	150—7000	15	150±30	0,30	6,5±1,0	156×98×60	К	240
1ГД-28	100—10 000	15	95±15	0,20	6,5±0,7	156×98×41	Ф	200
1ГД-30	120—7000	15	180±10	0,20	6,5±1,0	∅126×42	Ф	190
1ГД-36	100—12 500	10	100±10	0,20	8±1,2	160×100×58	К	270

1ГД-37	100—10 000	12	100±10	0,28	8±1,2	160×100×64	К	420
	140—10 000		140±10					
1ГД-39	200—6300	15	240±40	0,20	8+1,2	⌀100×36	Ф	200
1ГД-40(Р)	100—10 000	12	100±10	0,27	8±1,2	160×100×45	Ф	310
	140—10 000		140±10					
2ГД-3	70—10 000	14	80±15	0,25	4,5±0,5	⌀152×69	К	400
			100±10					
2ГД-4	70—10 000	14	80±15	0,23	5,0±0,5	⌀152×54	Фэ	300
			100±10					
2ГД-7	70—10 000	15	80±10	0,23	4,5±0,5	⌀152×62	К	230
			100±10					
2ГД-ВЭФ	80—7000	15	90±10	0,23	4,5±0,5	⌀152×75	К	500
2ГД-19	80—10 000	15	80±10	0,20	4,5±0,5	⌀152×54	Фэ	350
(2ГД-19М)			100±10					
2ГД-28	70—10 000	15	80±10	0,20	4,5±0,5	⌀152×55	Ф	250
			100±10					
2ГД-22	100—10 000	15	100±10	0,20	12,5±2,0	280×82×77	К	450
			70±15					
2ГД-35	80—12 000	15	100±15	0,20	4,5±0,5	⌀152×52	Ф	300
2ГД-36	2000—20 000	15		0,20	8,0±1,2	80×50×35	К	95
2А-9	40—1000	16	40±5		12±2,0	⌀341×195	А	13 500
2А-11	35—3000	16	35±5		12±2,0	⌀500×190	К	15 000
2А-12	40—3500	16	40±5	0,35		⌀341×190	А	
3ГД-1РРЗ	120—5000	10	120±20	0,30	8,0±2,0	⌀150×54	Ф	400
3ГД-2	5000—18 000	10		0,25	15,0±2,0	⌀80×30	Ф	200
3ГД-7	80—7000	14	90±10	0,25	4,5±0,5	204×134×77	К	650
3ГД-9	80—7000	14	80±10	0,25	5,0±0,5	204×134×65	Ф	900
3ГД-15(м)	1000—18 000	15	270±30	0,25	6,5±1,0	⌀105×64	К	230
3ГД-16	80—8000	18	80±10	0,25	4,5±0,7	204×134×67	К	330
3ГД-28	80—8000	18	80±10	0,25	4,5±0,7	204×134×55	Ф	410
3ГД-31	3000—18 000	15		0,20	8,0±1,2	⌀100×48	Ф	340
3ГД-38	80—12 500	15	80±10	0,20	4,0±0,5	⌀160×74	К	380

Тип головки	Номинальный диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Основная резонансная частота, Гц	Среднее стандартное звуковое давление, Па	Модуль полного сопротивления на частоте 1 кГц, Ом	Размеры, мм	Тип магнита	Масса, г, не более
4ГД-1	60—12 000	14	60±10 80±10	0,25	4,5±0,5	∅202×100	К	600
4ГД-2	60—12 000	14	60±10	0,25	5,0±0,5	∅202×80	Фэ	900
4ГД-4	60—12 000	10	55±10	0,27	8,0±1,2	∅202×100	Ф	1500
4ГД-5	60—5000	10	55±10	0,30	8,0±1,2	∅202×100	Ф	1500
4ГД-6	200—5000	10	200±20	0,20	8,0±1,2	∅80×38	Ф	350
4ГД-7	60—12 000	15	60±10	0,25	4,5±0,5	∅202×80	К	430
4ГД-8Е	125—7100	18	120±20	0,30	4,0±0,5	∅125×49	Ф	600
4ГД-9	100—8000	18	120±20	0,25	4,5±0,5	204×134×54	Ф	
4ГД-28	60—12 000	15	60±10 80±10	0,20	4,5±0,5	∅202×71	Ф	535
4ГД-35	63—12 500	10	60±10	0,30	8,0±1,2 4,0±0,5	∅202×74	Ф	900
4ГД-36	63—12 500	10	60±10	0,20	8,0±1,2	∅200×85	К	650
4ГД-43	63—5000	12	80±20	0,20	4,0±0,5	∅125	Ф	600
4А-28	70—14 000	16	60±10	0,28	15,0±2,0	∅258×90	Ф	1500
4А-30	60—12 000	14	60±10	0,30	5,0±0,5	∅258×90	Ф	1500
4А-32	40—16 000	12	40±5	0,35	16,0±2,0	∅335×215	К	10 000
4А-36	80—10 000	12	80±5	0,31	15,0±2,0	∅258×106	Ф	—
5ГД-1РРЗ	80—10 000	14	65±10	0,40	4,5±0,5	260×180×108	К	750
5ГД-3РРЗ	40—5000	12	30±5	0,30	10±1,5	∅252×106	Ф	1300
5ГД-10	50—12 000	15	50±10	0,30	4,5±0,5	∅252×126	А	1700
5ГД-14	70—12 000	14	70±10 90±10	0,25	4,5±0,5	252×170×100	К	700

5ГД-18	70—12 000	15	70±10	0,25	4,5±0,5	254×170×80	К	450
10ГД-34	63—5000	15	80±8	0,1	4,0±0,5	⌀125	Ф	1500
5ГД-19	100—10 000	18	90±15	0,25	4,5±0,7	254×170×91	К	525
5ГД-28	100—10 000	18	90±15	0,25	4,5±0,7	254×170×68	Ф	540
6ГД-1РРЗ	60—6500	15	48±8	0,40	7,0±1,0	327×255×130	К	1300
6ГД-2	40—5000	10	30±5	0,30	8,0±1,2	⌀252×135	К	1560
6ГД-3	100—10 000	12	85±15	0,40	4,0±0,4	240×160×87	Ф	1200
6ГД-6	63—5000	15	55±15	0,10	4,0±0,5	⌀125×80	Ф	1500
8ГД-1	40—1000	10	30±5	0,20	8,0±1,2	⌀252×135	К	5800
8ГД-1РРЗ	50—7000	14	55±15	0,45	12,0±1,5	⌀300×150	А	5000
10ГД-17	40—8000	14	50±10	0,30	4,5±0,5	⌀295×140	А	1500
10ГД-18	50—8000	12	50±10	0,30	8,0±0,8	324×212×128	А	2000
10ГД-28	40—6000	12	40±10	0,30	4,5±0,7	⌀295×112	А	1300
10ГД-30	30—5000	15	28±5	0,15	8,0±1,2	⌀240×126	К	2500
15ГД-10	63—12 500	12	60±5	0,25	$15\pm^{1,5}_{3}$	⌀270×115	А	1400
25ГД-26	40—5000	12	60±5	0,15	4±0,3	⌀200×126	А	2400
50ГД-2-25	30—1000	12	25±5	0,2	4±0,3	⌀315×156	А	4000
10ГД-35	5000—25 000	12	5000	0,25	15±1	100×100×47	Ф	1000
30ГД-1	30—1000	12	25±0,5	0,15	4,0±0,5	⌀250	Ф	4700

Примечания: 1. Первое число в обозначении типа головки указывает ее номинальную мощность в ваттах.

2. Громкоговорители, габариты которых указаны тремя числами без знака ⌀, имеют диффузоры эллиптической формы, у остальных диффузоры круглые. Первые числа указывают диаметр диффузородержателя, последнее число — высоту головки.

3. Для головок, выпускаемых с двумя значениями резонансной частоты подвижной системы, указанная в таблице нижняя граница номинального диапазона изменяется в соответствии с повышением резонансной частоты.

4. В графе «Тип магнита» приняты следующие обозначения: А — кольцевой магнит из сплава АН-3 (альни-3) или ЮНДК-24 (альнико); К — керновый магнит сплава ЮНДК-24 (ЮН13ДК-24) или АНКО-4; Ф — кольцевой магнит из феррита бария 2БА; Фэ — то же с экранированной магнитной системой.

5. Модуль полного сопротивления высокочастотных головок измеряют на низшей частоте номинального диапазона.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 44 коп.